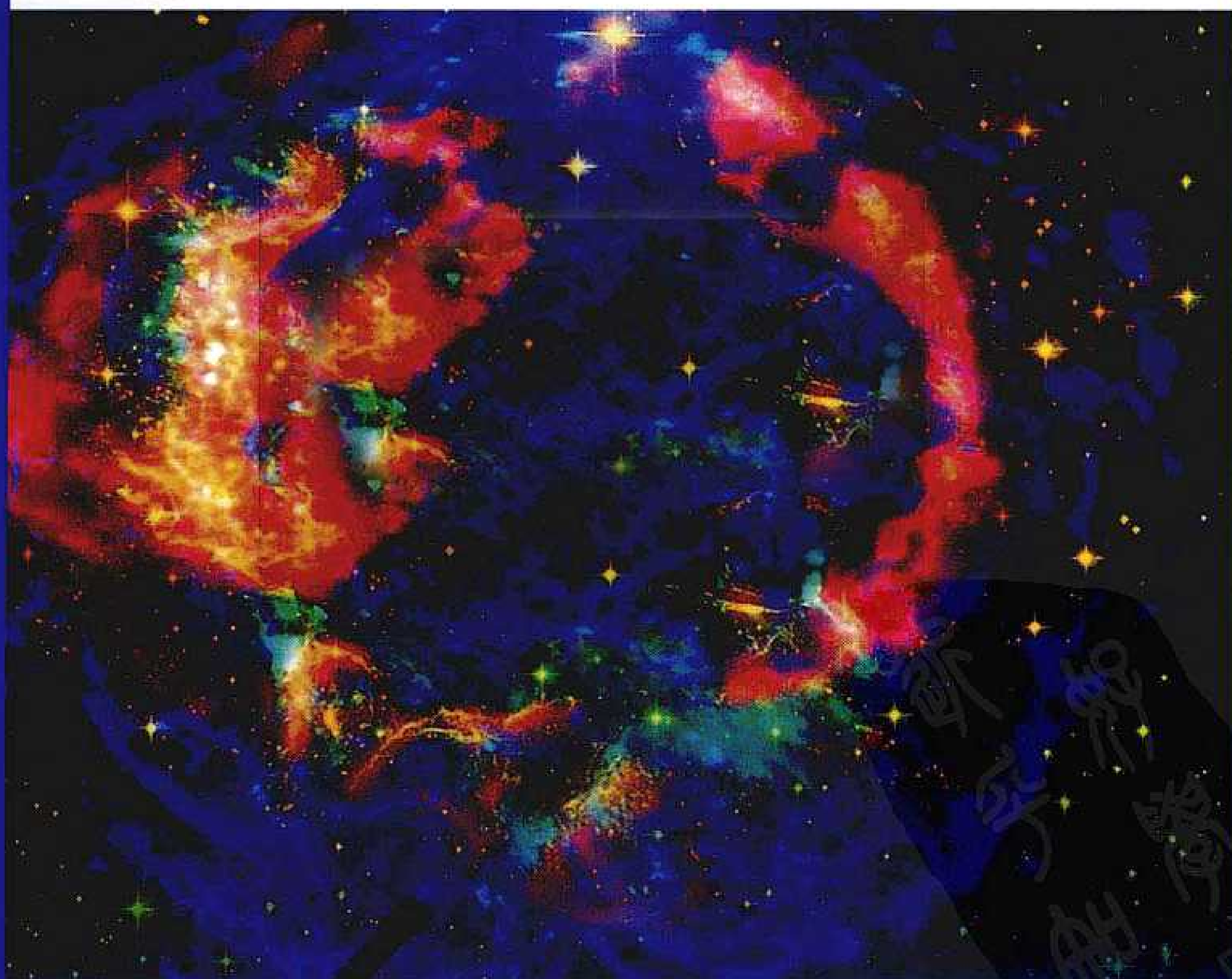
科学图书馆 我们世界中的物理

PHYSICS IN OUR WORLD

粒子与宇宙

PARTICLES AND THE UNIVERSE

[美] 凯尔·柯克兰德 著 雷泉 译





上海科学技术文献出版社

《粒子与宇宙》

人们对于核技术和宇宙起源等物理理论耳熟能详，而对于日常生活的物理现象却知之甚少。“我们世界中的物理”是一套6册丛书，全景式地描述了对技术和社会产生影响的物理现象，有助于人们了解宇宙的本质和规律。

《粒子与宇宙》评述了艾萨克·牛顿爵士以及与他同时代的物理学家的定律和理论如何通过研究和实验而演化成了“现代”物理学。本书论及的那些观察、理论及其检验极大地推动了人类先前未曾涉足的宇宙新领域的科学知识发展。

《粒子与宇宙》包括了以下内容：

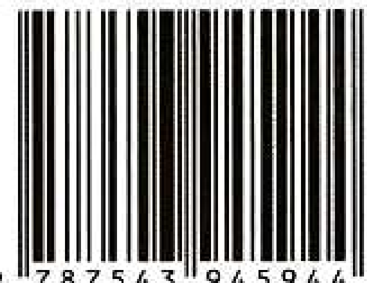
◇ 核物理：辐射、武器和反应堆
◇ 量子力学
◇ 粒子物理学
◇ 相对论
◇ 宇宙学

这本书包括了40多幅黑白照片和插图，附录化学元素周期表和化学元素表。“我们世界中的物理”丛书是为那些渴望了解有趣的物理学知识的学生、老师和普通读者提供的一套基础读物。

我们世界中的物理

原子与材料　　光与光学
电学与磁学　　粒子与宇宙
力学与动力学　　时间与热动力学

凯尔·柯克兰德博士(Kyle Kirkland)，1998年在宾夕法尼亚大学获得神经科学的博士学位，主要研究方向是视觉系统和神经网络。他的跨学科背景和兴趣促使他发表了关于科学的历史以及科学在当前和未来对社会的影响等多篇文章。凯尔·柯克兰德同时也是Facts On File出版公司出版的“科学与技术焦点”丛书中的《光学》一书的作者之一。


ISBN 978-7-5439-4594-4

定价：18.00元

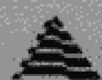
科学图书馆 我们世界中的物理

PHYSICS IN OUR WORLD

粒子与宇宙

PARTICLES AND THE UNIVERSE

[美] 凯尔·柯克兰德 著 雷泉 译



上海科学技术文献出版社

图书在版编目(CIP)数据

粒子与宇宙 / (美)凯尔·柯克兰德著;雷泉译. 一上海:上海科学技术文献出版社,2011.1
(科学图书馆. 我们世界中的物理)
ISBN 978-7-5439-4594-4

Ⅰ.①粒… Ⅱ.①凯…②雷… Ⅲ.①粒子—普及读物②宇宙—普及读物 Ⅳ.①O572.2-49②P159-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 235626 号

Physics in Our World: Particles And the Universe

图字:09-2008-207

责任编辑: 刘仁焰
封面设计: 徐　利

粒子与宇宙
[美]凯尔·柯克兰德 著
雷 泉 译

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市长乐路 746 号 邮政编码 200040)
全国新华书店经销
江苏昆山市亭林彩印厂印刷

*

开本 740×970 1/16 印张 7.5 字数 133 000
2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-5439-4594-4
定价: 18.00 元
http://www.sstlp.com

谨以此书献给乔治·格斯坦教授，

他是一位卓越的科学家，更是一位卓越的人。



内 容 简 介

世界上最小的粒子是什么？浩瀚的宇宙又蕴藏着什么样的奥秘？翻开《粒子与宇宙》这本书，你就开始了一段穿越时空的旅行。你可以到粒子动物园去看看夸克是什么样子，也可以乘上宇宙飞船到苍茫的太空中去捕捉来自天外的信号，你还可以扇动着想象的翅膀回到时间的起点去一睹大爆炸的悲壮，或者飞向未来去看看数十亿年之后的宇宙将会怎样。一个小小的原子何以能毁灭地球？光是波还是粒子？所有的物质都是由什么构成的？我们能回到过去吗？宇宙从哪里来又将到哪里去？所有这些已知的、未知的世界之谜都等待着你去探索。《粒子与宇宙》一书分5章介绍了核物理、量子理论、粒子物理、相对论和宇宙学的有关知识，深入浅出地为我们再现了知识发现的过程，并介绍了这些知识的当前或者潜在应用。这本书集科学性与趣味性于一身，从微观到宏观，从过去到未来，既传递信息，又启发思考。经典物理学让位于现代物理学是科学发展的必然结果，然而，关于世界的奥秘，我们要去探索的还有很多很多……

前　言

1945 年,两枚核弹终结了第二次世界大战,这是对物理学威力的一次展示,让人惶恐而又令人信服。由世界上最杰出的一些科学头脑酝酿出的这次核爆炸摧毁了广岛和长崎这两座日本城市,迫使日本不得不无条件投降。应该说,物理学和物理学家的身影贯穿于第二次世界大战的始终,而原子弹只是最生动的一个例子。从那些用于炸坝的在水中跳跃前进的炸弹到那些感应到船体出现便发生爆炸的水下鱼雷,第二次世界大战实际上也是一场科学的较量。

第二次世界大战让所有人,包括那些多疑的军事领导人相信,物理学是一门很重要的科学。然而,物理学的影响远远延伸到了战场之外,物理学原理几乎关系到世界的每个部分,触碰了人们生活的方方面面。飓风、闪电、汽车引擎、眼镜、摩天大厦、足球,甚至包括我们怎么走、怎么跑,所有这一切都要服从科学规律的安排。

在诸如核武器这样的话题或者有关宇宙起源的最新理论面前,物理学和我们日常生活的关系往往显得黯然失色。"我们世界中的物理"这套丛书的目标就是去探究物理学应用的各个方面,描述物理学如何影响科技、影响社会,如何帮助人们理解宇宙及其各个相互联系的组成部分的性质和行为。丛书覆盖了物理学的主要分支,包括如下主题:

- 力学与动力学
- 电学与磁学
- 时间与热动力学
- 光与光学
- 原子与材料
- 粒子与宇宙

"我们世界中的物理"丛书的每一册均阐释了有关某个主题的基本概念,然后讨论了这些概念的多种应用。虽然物理学是数学类学科,但这套丛书主要聚焦于思想的表达,而数学知识并不是重点,书中只涉及一些简单的等式。读者并不需要具备专门的数学知识,当然,对于初等代数的理解在有些时候还是很有帮助的。实际上,每一册可

以讨论的话题的数量几乎是无限的，但我们只能选取其中的一部分。令人遗憾的是，不少有趣的东西就这样不得不被省略掉。然而，丛书的每一册都涉猎了非常广泛的材料。

我曾经参加过一个讨论会，会上一位年轻学生问教授们，是否需要备有最新版本的物理教科书。有一位教授回答说，不，因为物理学的原理“多年来一直没有改变”。这个说法大体上是对的，但这只是对物理学的效力的一个证明。物理学的另一个支撑来源于建立在这些原理之上的令人吃惊的诸多应用，这些应用仍在不断扩展和变化，其速度之快非同寻常。蒸汽机已经让位给了用在跑车和战斗机上的强大内燃机，而电话线也正在被光导纤维、卫星通讯和手机等取代。这套丛书的目标就是鼓励读者去发现物理学在各个方面、各个领域所起的作用，现在的、过去的以及不远的将来的……

简　介

1665—1666年间，由于瘟疫流行，艾萨克·牛顿(Isaac Newton)被迫离开了剑桥大学，这使他有了大量的时间来进行实验，后来他被授以爵位，成为了艾萨克公爵。他非常充分地利用了这段时间，作出了许多重要的发现，这些发现为他几十年后发表的物理规律奠定了基础。牛顿的方程式精确地描述了加速度和运动，他的万有引力定律用一种简洁的、数学化的方式解释了存在于地球上以及整个太阳系中的引力。

牛顿物理学统治物理学界长达200余年。在牛顿看来，力的作用导致运动的变化，这些变化是决定了的而且可以精确地计算出来，时间和空间等概念都是绝对的，对所有人都一样。长期以来，物理学家都接受这种观点，直到20世纪，开始出现了一些例外。由于更加完善的仪器和更富有想象力的理论的出现，人们开始探索一些日常生活中不能碰见的物体和事件——原子内部的微小粒子，巨大的物体例如整个宇宙以及大大小小物体的高速运动。在很多情况下，牛顿所描述的规律再也无法立足，人们需要新的规律以及一些全新的概念。在我们熟悉的情形下，这些新规律还原成了已有的旧规律，但却极大地拓展了旧规律的适用范围和精确性。

《粒子和宇宙》这本书记述了牛顿物理学不能成立的一些现象，解释了构成一整套新规律基础的"现代"物理学。科学方法是不会改变的——观察导致理论的产生，而理论的正确性需要被检验。《粒子和宇宙》的每一章涉及一个特定话题，深入研究了有关这个话题的观察、理论和检验：

- 核物理
- 量子力学
- 粒子物理学
- 相对论
- 宇宙学，有关宇宙的研究

核物理探讨原子的中心部分即核子的属性和行为。核物理也许是20世纪对世界产生过最大影响的物理学分支，因为正是核物理演化出来的知识帮助人们制造了有史以来最具破坏性的武器。1945年结束第二次世界大战的原子弹和接下来的军备竞赛

改变了历史的进程。核物理的应用也为和平目的提供了巨大的能量，世界上电能的16％是由核反应产生的。

原子的组成成分等微小粒子的奇特行为要求物理学家对他们的理论作出修正，并改变理解和应用这些理论的方式。量子力学提出了一些用来描述粒子的运动和性质的方程式，但采用了一种特殊的度量方法。物体的属性倾向于具有离散的特点——它们的值像整数(…−2，−1，0，1，2，…)一样按特定的数量增加，而不是像连续的实数那样可以是任何数值。量子力学中的计算引入了一定量的不确定性，这种不确定性永远也不会消失。在量子力学提出之前，物理学家也要和不确定性打交道，但这种不确定性是由于知识的缺乏而产生的，而在新理论中，不确定性是由物理性质本身造成的。

为了进一步探索物质的性质，物理学家建造了能够使粒子以接近光速的速度在通路上运动的巨大加速器。高速运动的粒子具有足够的能量，粒子之间发生碰撞，可以把粒子撕开或者生成一些全新的粒子，结果发现存在着成百上千种粒子。粒子物理对这些粒子进行分类，确定它们的性质，解释它们在相互作用过程中的作用力，是物理学的一个重要分支。

极端高速是又一种需要用新鲜观点来审视的物理现象，粒子加速器可以使粒子达到极端高速。在巨型粒子加速器制造出来的几十年前，历史上最伟大的物理学家之一艾尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)致力于思考这样一个问题：物理规律对于运动着的观察者来说是什么样的。爱因斯坦相信，物理规律对所有的观察者来说都是一样的，他在1905年发表了狭义相对论，对变慢的时钟和收缩的长度作出了奇特但却准确的预测。10年之后，爱因斯坦又发表了广义相对论，涉及万有引力。广义相对论产生了惊人的影响，它使人们发现了太空中的一种高致密的物体，就连光线都不能从这种物体中逃逸出来。到目前为止，爱因斯坦的理论经受住了所有考验。

狭义相对论和广义相对论也是研究宇宙的重要工具。这些理论能够帮助天文学家理解用望远镜和其他仪器得到的观察结果，进而揭示大量壮观的物体和事件。其中，最引人注目的一种现象就是宇宙膨胀，但就连爱因斯坦本人起初也不相信广义相对论的这个预测。

本书的每个章节都描述了由新发现带来的深刻变化以及它的一些应用，例如震动地球的武器、能对人脑活动进行成像的机器和精确的卫星导航系统。20世纪物理学的兴起改变了科学的版图，产生了一些新思想和新理论，极大地推动了人类未曾涉足的新领域的科学知识的发展。

目　录

1

核物理：

辐射、武器和反应堆

早在20世纪初，年轻的化学家乔治·赫维西(George de Hevesy，1885—1966)在吃由女房东准备的食物时，怀疑食物是上一顿吃剩下的，他决定检验一下自己的怀疑。有一天，他在吃完饭后往残留在盘子上的食物中注入了很少量的没有危害的化学物质。这种物质具有微弱的放射性：它的原子向外辐射能够由敏感仪器检测到的射线。后来，赫维西的女房东给他端上了一份具有放射性的食物——里面有他上一顿留在盘子里的食物。

赫维西是广泛应用放射示踪技术的先驱，他和其他一些科学家引领了现代核物理应用的道路。原子核的物理学导致了大量震惊世界的科学发展：古老物质的放射性年代鉴定、产生巨大电能的核能反应堆、最具毁灭性的核弹。本章描述了这些重要的发明，并阐述了核物理的基本原理。

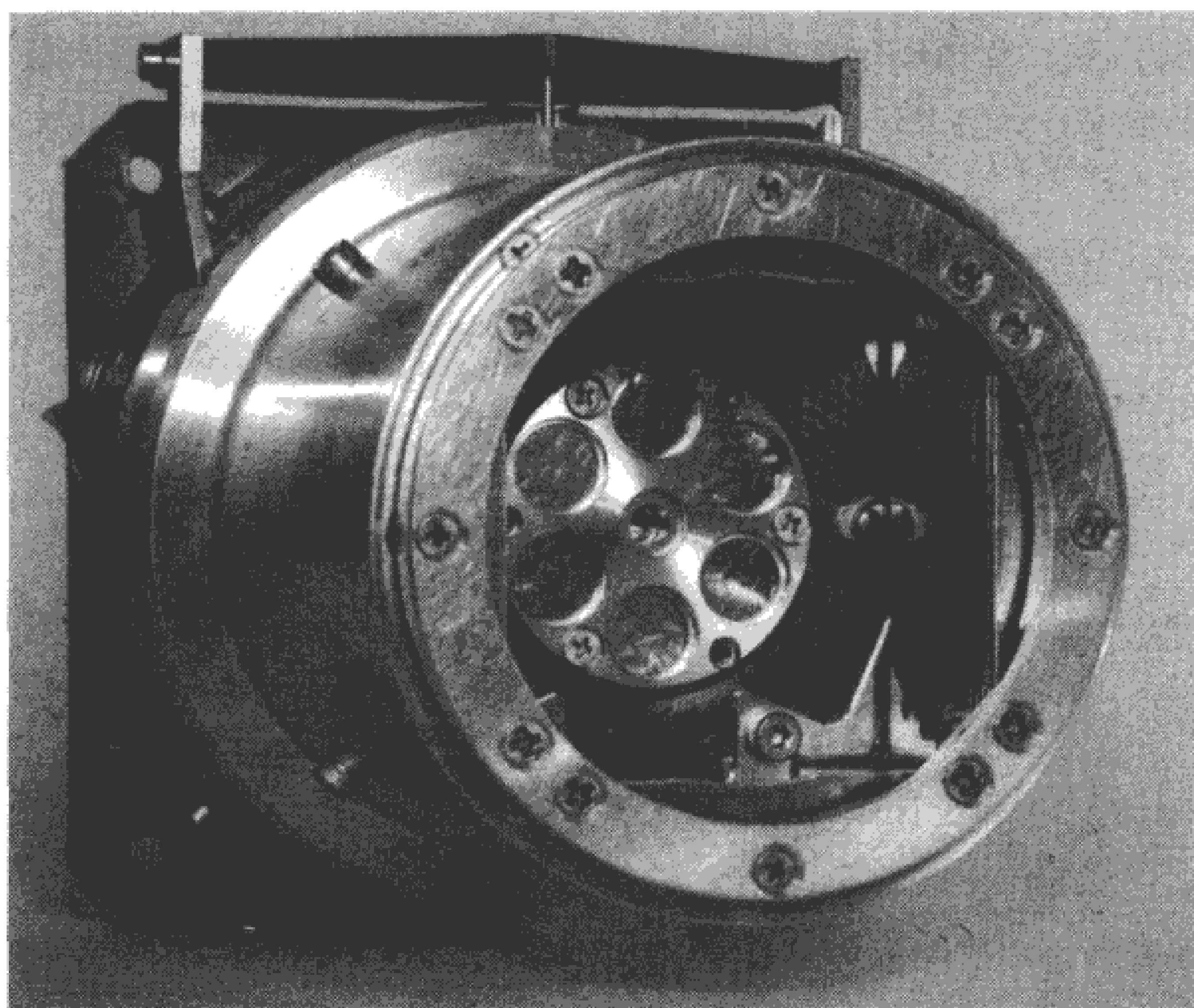
原子核对20世纪物理学的形成有着重要贡献，它由被叫做质子和中子的微小粒子组成。原子核非常之小，1 000亿个原子核堆在一起才有一根头发那么粗。

原子核

1896年，法国物理学家安东尼-亨利·贝克勒尔(Antoine - Henri Becquerel，1852—1908)在沥青油矿中发现了放射线，不知不觉地开启了核物理的时代。沥青油矿是一种包含铀元素的矿物质，铀的含量越高，放射线就越多，所以铀是一种重要的元素。波兰物理学家玛丽·居里(Marie Curie，1867—1934)创造出辐射(radioactivity)这个术语用来描述这些射线的发射。居里夫人和她的丈夫皮埃尔·居里(Pierre Cu-

rie, 1859—1906)一起发现了一种更强的放射源,那就是镭元素(镭的放射性非常强,纯净的镭在黑暗中能够发光,而铀是不能的)。由于贝克勒尔和居里夫妇的杰出工作,他们共同分享了 1903 年的诺贝尔物理学奖。

辐射是伴随原子核的放射性衰变过程产生的射线发射。直到 1911 年,原子核才被新西兰/英国物理学家欧内斯特・卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937)所发现。在一系列后来对世界产生深刻影响的实验中,卢瑟福用一束 α 粒子轰击一片很薄的金箔。在这个时代,科学家们还不知道原子是由什么构成的,很多人都接受由英国物理学家约瑟夫・约翰・汤姆生(Joseph John Thomson, 1856—1940)公爵提出的一种理论。汤姆生是一位杰出的科学家,他在 1896 年发现了原子中带负电的电子。汤姆生认为,原子(通常情况下不带电)是由镶嵌着电子的一团带正电的物质组成的。卢瑟福决定通过测量金原子对 α 粒子的散射来探索原子的内部结构。因为 α 粒子是带正电的,所以卢瑟福预测有一些 α 粒子在穿越金箔上的原子层时会发生轻微的偏折。但令他吃惊的是,有一些 α 粒子在碰到金原子之后被反弹了回来!



现代的仪器同样运用 α 粒子。装载在“勇气”号火星探测器上的这个仪器向土壤发射 α 粒子和其他射线,对反射回来的成分进行分析,从而探索火星表面的情况。(NASA・JPL)

对卢瑟福实验的正确解释是,原子内部包含了一个很小的带正电的核心。大部分α粒子如所预期的那样略有偏折地穿越了原子层,而少部分α粒子因为碰到了一个坚硬的、致密的物体而被反弹回来。一幅原子的新图像浮现出来:原子是由微小的带正电的原子核和环绕着原子核的带负电的一群电子组成的。正电和负电互相抵消,所以整个原子是电中性的。

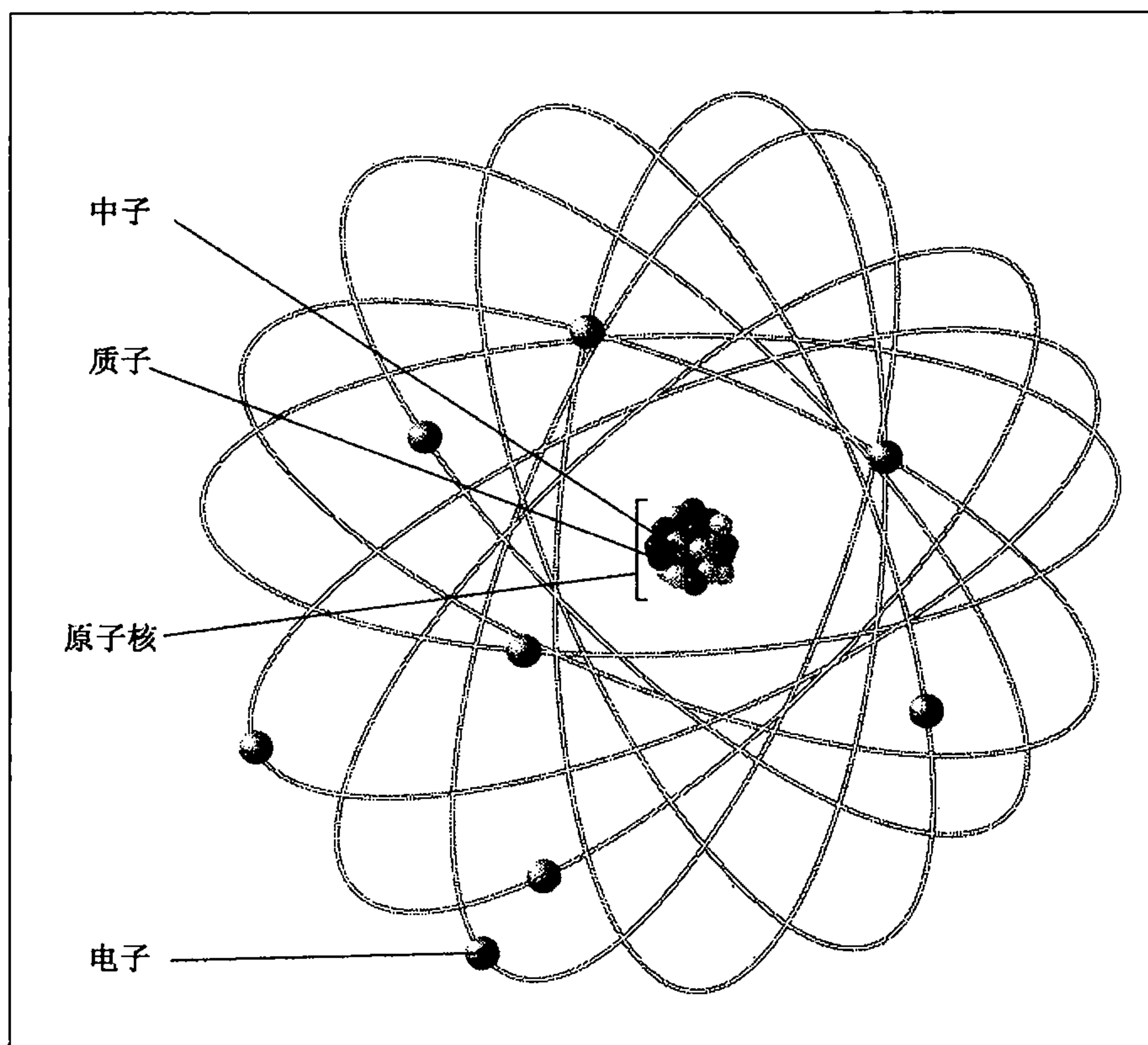
若干年后的1919年,卢瑟福确定了原子核中带正电的粒子,他把它们命名为质子。质子这个名称来源于希腊词 protos,是“第一”的意思。质子比电子重1 836倍。但后来的发现表明,原子核除了质子外还包含其他的粒子,1932年,英国物理学家詹姆士·查德威克(James Chadwick, 1891—1974)公爵发现了中子并确定了它的质量。中子略重于质子,大约是电子质量的1 840倍。正如它的名字所表明的那样,中子是电中性的。由于这一重要发现,查德威克很快获得了1935年的诺贝尔物理学奖。卢瑟福因为早期在放射性研究方面所做的工作获得了1908年的诺贝尔化学奖。

这样一来,原子的基本图像就比较完整了。如图所示,质子和中子位于原子的核心,外面环绕着一群电子。电子和质子所带的电量相等但符号相反,而且正常状态下的原子包含相同数量的电子和质子。中子增加了原子核的质量但没有增加它的电量。原子核中质子的数目是原子序数;每种化学元素有着不同的原子序数。例如,碳原子的原子序数为6(6个质子),铁原子的原子序数为26。原子核也包含了一定数量的中子,但中子的数量是可以变化的——同一种元素的原子可以包含不同数量的中子。例如,碳原子的原子核总是包含6个质子,但却可以包含6个、7个或8个中子。原子的质量数等于它的核子数(质子和中子)。包含不同中子的同一种元素的原子被称为同位素。包含6个质子和6个中子的碳的同位素的质量数为12(命名为碳12),包含6个质子和8个中子的碳的同位素质量数为14(碳14)。

有关原子结构的图画仍然是物理学的一个重要部分,在本书的后面部分我们将会看到,最近的一些发现使这张图画变得更为复杂,但对原子结构的基本描述在本质上是正确的。

令人迷惑不解的是,为什么带正电荷的质子能够聚合在一起?异种电荷相互吸引(质子和电子相互吸引)但同种电荷相互排斥,那么为什么质子能够紧密地堆积在原子核中呢?质子之间肯定存在着另一种作用力,物理学家把这种力叫做强核力,通常就叫做强力。这种作用力非常强大(因此得名),它牢牢地把质子和中子捆绑在原子核中。但是,粒子之间的距离必须很近才行,因为强力随着距离的增大而迅速变弱。质子之间通常是相互排斥的,因为它们带有同种电荷。但是,一旦它们彼此靠得很近,强力的作用

就可以克服电荷之间的相互排斥。一般说来，自由的质子是不会自动聚集在一起形成原子核的，但在特定情形下（例如它们发生高速碰撞）强力就会把它们捆绑在一起。还存在一种弱核力，通常被叫作弱力，弱力也是一种短程的核力。弱力在后面将会提到的许多放射过程中起作用，例如 β 粒子的产生。强力大概比弱力强 10 亿倍。



一群电子环绕着原子核。原子核由紧密结合在一起的中子和质子组成。

放射性起因于原子核的衰变。某些原子的原子核是不稳定的；就像一根在末端立起的棍子倾向于倒下，一个不稳定的原子核注定要发生变化。这个变化涉及射线的发射，标题为“辐射”的知识窗详细地描述了这种现象。这个过程往往导致原子核中一个或多个质子或中子的转变，如果质子的数目发生了改变，就产生了另一种元素。例如，碳 14 具有放射性并衰变成氮 14；铀 238 衰变成钍 234。古代的炼金术士一直在寻找把铅等元素转变成金的方法，他们没有成功，他们从未意识到有一些元素由于具有放射性会自发地完成这种转变。

正如知识窗所解释的那样,放射性同位素衰变的速度是恒定不变的,因此放射活动就像一座时钟。衰变在时间上的精确性使它在放射性年代鉴定中有了用武之地,即衰变可以用来测定物质的年代。如下页的知识窗中的内容所述,只要知道了某种放射性物质的初始含量,我们通过测定放射性原子的剩余量并运用半衰期规则,就能知道这种物质的年龄。举例来说,如果一份样品衰变到初始含量的 1/8,那么这份样品的年龄就是 3 个半衰期那么长。

有些时候,某种放射性物质的初始含量只能粗略地估计出来。但对于地球上发现的大量的同位素,例如铀、钍等元素,我们利用这些同位素各自的比例以及它们的衰变速率可以精确地测算出它们所在的岩石的年龄。物理学家通过这种方法揭示了地球的年龄大约为 45 亿年,使用不同种类同位素所得到的测算结果是一致的,这使物理学家们对这个年龄有了充分的信心。科学家们还测定了从陨星上取得的样品,测算结果表明太阳系的其他部分与地球大概是在同一个时间形成的。

另一种精确的年代鉴定方法采用了同位素碳 14。这是鉴定有机物质或者生命相关物质的一种方法,因为有机物质中含有碳元素。这种方法称为碳放射年代鉴定,其之所以有效,是因为所有有机体都在不断地吸收含有碳的物质。动物吃的食物中含有大量的碳,这些碳存在于碳水化合物、蛋白质和脂肪中,而植物利用二氧化碳和阳光来合成碳水化合物。地球上平均每万亿个碳原子中有一个是放射性的碳 14 原子,它的半衰期是 5 700 年(大多数的碳原子是诸如碳 12 的稳定的同位素)。当植物或动物活着的时候,它们体内的碳 14 原子的数量是恒定不变的,因为有机体总在不断地消耗新的碳元素。当植物或动物死亡之后,它们就不能再吸收碳元素了,其体内的碳 14 原子开始衰变却得不到更新。通过测定有机体剩余的碳 14 的含量,科学家们可以确定这个有机体在多少年以前是活着的。用碳放射年代鉴定法对年龄为几千岁的物体进行测定,可以得到相当准确的结果,但是如果一个物体的年龄超过了 5 万年,测定就会变得非常困难,因为残存在物体中的碳 14 已经非常稀少了。

应用碳放射年代鉴定法的一个非常有名的例子就是正在进行的对"冰人"的鉴定。1991 年,一群徒步旅行者在攀登位于奥地利和意大利之间的山脉时发现了一具木乃伊——一具在冰雪中保存完好的男性遗体。碳放射年代鉴定表明这位男性大约是在 5 300 年前死去的(这个时间和环境使之成了一个真正的"冷箱")。这个冰人"奥茨"是迄今发现的最为古老、保存得最为完好的木乃伊之一。

除了对物体进行年代鉴定之外,放射性还有其他的用途。一个最为常见的应用存在于几乎任何一栋建筑物中——烟尘检测器。这些装置能够检测空气中存在的烟尘

知识窗

辐射

20世纪初期，研究辐射的物理学家发现辐射包含不同种类的射线。卢瑟福根据射线被吸收的难易程度区分出两种射线。他把第一种射线——能够被一张纸阻挡的射线命名为α粒子，把另一种不那么容易被吸收并能渗透进物体的射线命名为β粒子。α和β是希腊字母表的头两个字母"阿尔法"和"贝塔"(字母表"alphabet"这个单词也是源于这两个字母)。法国物理学家保罗·维拉德(Paul Villard, 1860—1934)发现了一种比α和β粒子能量更大的射线。顺着希腊字母表，这种射线被命名为γ射线，来源于第三个希腊字母"伽马"。

α粒子带正电，由捆绑在一起的两个质子和两个中子组成，这和元素氦的原子核是一样的，有些时候物理学家就把α粒子当作氦核。铀238衰变成钍234时发射出一个α粒子。β粒子带负电——它们是电子。碳14衰变为氮14时发射出β粒子。碳14的一个中子衰变为一个质子并发射出一个电子，即β粒子，这个电子得以逃脱是因为它具有很高的能量。衰变之后，原子核总的核子数不变，但却多了一个质子，少了一个中子。γ射线和光线一样是一种电磁波(也叫电磁辐射)，只是具有高得多的频率。电磁辐射的能量取决于它的频率——频率越高，能量也越高。γ射线的频率高达10^{20} Hz(次每秒)甚至更高，这比可见光高出200万倍，因此γ射线蕴含了极大的能量。γ衰变在放射性原子核处于激活或高能状态时发生。γ射线的产生除了降低原子核的能量以外不会给原子核带来其他改变。

总共存在大约3 500种同位素，它们中的很多都具有放射性，原子序数大于83的所有原子核都具有放射性——这些比较重的同位素不稳定，会发生衰变。3 500种同位素中的绝大多数在地球上的含量都很小，而且大部分是在实验室实验中被制造或被发现的。但自然界中确实包含了丰富的放射性同位素，例如碳、铀和其他一些元素的同位素。

有两个因素决定了一种物质的辐射量。一个因素是放射性原子的数量；就像沥青油矿一样，越多的放射性原子产生越多的辐射。另一个因素是存在于物质中

并向居住者警报火险。光电式烟尘检测器是一种类型的检测器，它让一束光线穿越空气样本；这就好像一束阳光穿过窗户，照亮了悬浮在屋子里的烟尘颗粒。但这种类型

的放射性同位素的种类。有些同位素,例如钾40,它们不稳定,会发生衰变,但是它们不慌不忙。就像一根几乎但却没有完全平衡的棍子一样,这些原子核相比于另一些放射性同位素更稳定,衰变得也更慢。其他一些同位素,例如铋211,它们更不稳定,因此迅速发生衰变。这些迅速衰变的放射性同位素在单位时间里产生大量的射线。

放射性同位素的衰变速率有一个重要特性:这个速率是恒定不变的。这个速率不受位置、条件或者其他任何因素的影响。物质在一定的时间间隔里衰变掉初始数量的一半,接下来在相同的时间间隔里又衰变掉剩余数量的一半,如此衰变下去。物理学家用半衰期这个术语来描述同位素的衰变速率;半衰期是样品衰变掉一半所需要的时间。例如,钾40的半衰期大约是12.5亿年,而铋的半衰期只有2.15分钟。这意味着一片钾40中的一半原子发生衰变需要12.5亿年,剩余的原子衰变掉一半又需要12.5亿年(衰变后剩余了原始数量的1/4),接下来,剩余的原子衰变掉一半又需要12.5亿年(之后剩下原始数量的1/8),一直这样下去。在$3\times 12.5=37.5$亿年之后,这些钾40原子只剩下了1/8,其余的7/8则衰变掉了。而对于铋211来说,衰变到只剩下初始数量的1/8,仅仅需要6.45分钟。

辐射是有害的,每个人在一生当中都会接触到小剂量的辐射。人体内甚至包含了少量的放射性同位素,例如碳14和钾40。从放射性同位素中产生的大剂量的辐射能够通过电离的方式破坏脱氧核糖核酸(DNA)等分子——射线具有足够的能量使电子从原子中脱离出来,从而使原子带电或者说变成离子。γ射线由于其能量很高,是尤其危险的能使原子电离的射线。DNA携带了有机体的遗传信息,DNA遭到破坏会导致基因突变。基因突变是一种遗传性的改变,通常是有害的。有一些仪器例如盖革计数器和放射量测定器可以用来检测和测量辐射,这些仪器通常是通过对电离的检测来实现目的的。我们应该对在有辐射的场所工作的人员加以监测,以免他们暴露在过多的辐射当中。这个电流通常是稳定的。然而,当空气中存在烟尘颗粒时,离子就会附着在烟尘颗粒上而不再传送电流,所以当电流变小时,检测器就会鸣响警报。

的烟尘检测器往往忽略掉那些非常微小的不足以反射大量光线的颗粒。另一种更为有效的烟尘检测器使用了微量的放射线来使空气发生电离。这种电离式检测器通常使用的具

有放射性的同位素是镅 241。正如知识窗“辐射”里提到的那样，射线能够使电子从原子中脱离出来，从而形成带电的离子，这样一来，烟尘检测器就能在空气样本中传送电流。

放射性的这些应用显示了它的有用性，也展现了开发这些应用的工程师们的聪明才智。然而更为重要的是，放射现象让物理学家得以瞥见原子的核心以及储存在这个核心里的巨大能量。

原子弹

1939 年第二次世界大战期间，物理学家已经对原子核进行了长达几十年的研究，理解了它的一些基本原理。放射现象表明原子核蕴含着丰富的能量，人们在想是否有可能驾驭这些能量。

20 世纪 30 年代，德国物理学家汉斯·贝蒂(Hans Bethe，1906—2005)认识到发光的天体是由核反应提供燃料的——在这个过程中，原子核发生转变并释放出大量的能量，这些能量存在于高速运动的粒子和包括可见光在内的电磁辐射中。这就解决了为什么太阳能够承受如此巨大的输出的奥秘。在核物理学家的发现之前，没有人知道太阳能量的真正来源；如果能量来源于煤或石油的燃烧(这是 19 世纪和 20 世纪初期的科学家们非常熟悉的物质)，那么太阳在耗尽它的所有燃料之前只能闪耀几百万年。贝蒂指出，如果太阳是由核反应提供能量的话，它可以更长时间地照亮我们的天空，贝蒂的论断被证明是对的。太阳已经存在了 45 亿年，至少还将继续存在几十亿年。

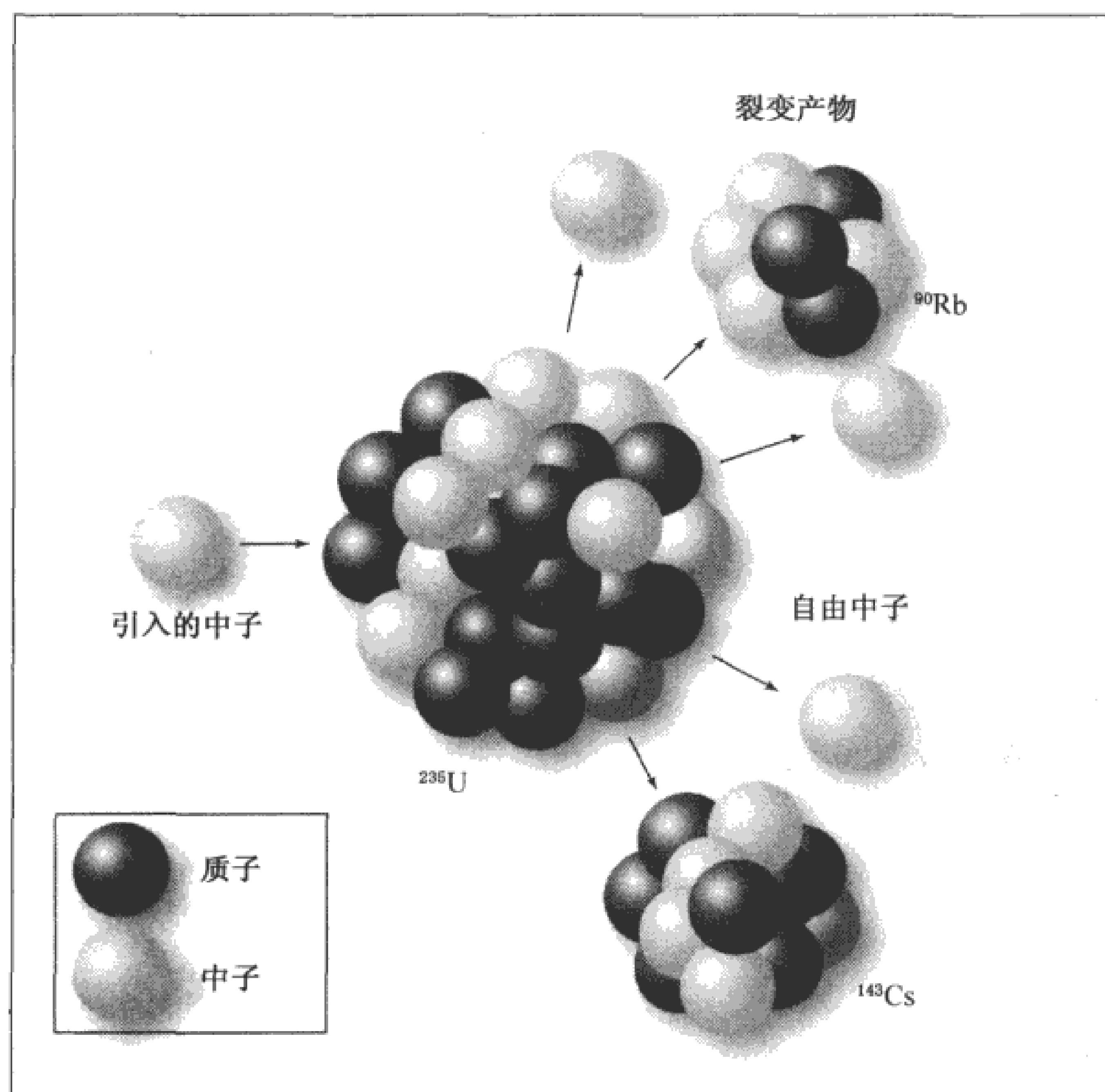
像辐射这样的原子核自发衰变仅仅是原子核释放能量的一种方式。另外两种方式是裂变和聚变。裂变是一个原子核分裂成两个或多个更小的部分。聚变即几个原子核聚合成一个更大的原子核。核武器的制造利用了这两种核反应。

通常情况下，强力把质子和中子紧紧地捆绑在原子核里。如果核子想逃离原子核，就必须克服强力这道障碍。质子之间存在电荷的相互排斥，它们总是在拼命地要把其他质子推出原子核，但光有电荷的排斥力是远远不够的。然而，只要增加一点点能量，核子就能逃脱了。有些时候，一个核子逃脱了或者自发地转变了——不需要任何帮助——就像前面段落里讨论的辐射一样。这些衰变起因于量子力学的一些奇特效应，我们在本书的后面部分将会详细描述这些效应。放射性衰变更有可能发生在含有大量粒子的原子核身上，因为这样的原子核拥有更多的自发衰变的机会。一个原子核包含的质子越多，就有越多的质子在彼此推挤，这是大的原子核不稳定的一个重要原因。

然而，裂变则是一个需要借助外在推动才能启动的过程。一旦得到推动，裂变反

应就能进行下去，释放出惊人的能量。第二次世界大战开始后，军事战略家开始考虑利用原子和原子核来制造武器——原子弹。由于担心德国可能会制造出这样一种毁灭性的武器来赢得战争，美国启动了一项设计和制造原子弹的计划，这就是著名的曼哈顿计划。德裔美国物理学家阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1955）是认为有可能制造出原子弹的最杰出的科学家之一。1933 年，为了逃离德国纳粹政府的迫害，爱因斯坦从德国移居到美国（爱因斯坦是犹太人，数百万犹太人被残忍的纳粹政权所杀害）。爱因斯坦并没有直接参与原子弹的制造，但他早在若干年前发现了核能的秘密：质能方程 $E = mc^2$，其中 E 表示能量，m 是质量，c 是光速。接下来的知识窗提供了有关这个著名方程的更多信息。

中子诱导的裂变反应的发现是导致原子弹的发明的另一个重要推动力。1934 年，意大利物理学家恩里克·费米（Enrico Fermi，1901—1954）和他的同事发现，当把中子加到铀中时，裂变反应发生了。一开始费米和他的研究小组并没有意识到他们的发现的重要性，这一发现在若干年后才得到很好的理解。如图所示，当一个中子撞击



铀核裂变生成两个更小的原子核和 1—3 个中子。

知识窗

$E = mc^2$

爱因斯坦不是在研究原子核的时候发现这个方程的，这个方程实际上是他建立的有关光和运动的理论的一部分。爱因斯坦是个令人惊异的理论家，他不做任何实验，即使做也是在他的脑子里做，他似乎总是能够抓住那些最困难、最抽象的思想。1905年，爱因斯坦在他发表的狭义相对论里面提出了一整套新颖的概念。他相信光在真空中的速度——186 200英里/秒(300 000千米/秒)，用c表示——是宇宙中所有物体运动速度的上限。爱因斯坦指出，没有哪个物体能够加速到这个速度或超过这个速度，他推导出一个方程，把物体的能量和它的运动联系了起来。当我们把这个方程中物体的速度v设置为0时，得到了一个有趣的结果：$E = mc^2$。这个能量就是物体的“静息能量”。本书第4章将对爱因斯坦的相对论作更深入的阐述。

爱因斯坦的理论被证明是正确的。质能方程$E = mc^2$表明能量和质量可以互相转化。这是一个相当古怪的想法。物理学家很早就认识到能量可以从一种形式转化为另一种形式——例如从化学能转化为机械能(汽车燃烧燃料，然后加速了)，却从来没有人认真考虑过能量转化成质量或者质量转化成能量。质量被认为是物质的数量，按照伟大的英国物理学家牛顿的看法，质量是和物体的惯性(对运动的

并粘到一个铀235原子核上时，这个铀核变得极不稳定并碎裂成更小的原子核，例如铷和铯。这个裂变过程的另外一些产物是不附着在任何原子核上的自由中子。跟原子核相比，这些中子似乎是不重要的产物，然而这种想法是错误的。后来发现，这些中子是产生链式反应的关键，由于有了它们，原子核里的巨大能量才得以释放出来。

在第二次世界大战期间制造原子弹的美国科学家们把他们的努力聚焦到这个裂变过程上面。要制造出原子弹，必须要有可裂变的物质，另外还必须找到诱导许多原子核同时发生裂变的方法。铀裂变可以把铀核质量的大约1‰转化为能量，从爱因斯坦的质能方程来看，相对于单个铀核的质量，这已经是一个很大的比例。但是，一个或者少数几个原子核释放的能量只够生产出一个鞭炮，而不是一颗威力无穷的炸弹。在这里，费米发现的中子诱导裂变有了用武之地，既然铀裂变生成的中子要比它消耗的多，这个裂变过程产生的中子数要大于引发裂变反应所需要的中子数(每个发生裂变的原子核要产生

抵制)联系在一起的。然而,爱因斯坦却提出质量可以转化为能量,而且转化的比率大得惊人。因为 c 的数值很大,当它平方后变成 c^2,数值就更大了,所以很小的质量就可以转化出巨大的足以爆炸的能量。

核反应的能量就是通过质能方程 $E = mc^2$ 来获得的。例如,当一个原子核分裂成两个或多个更小的部分时,裂变就发生了。反应所得产物的质量之和并不等于反应前的物质的质量——质量变小了,一部分质量消失了。消失的质量转化成了能量。同样的现象在化学反应中也会发生,例如钠和氯化合成食盐氯化钠。这个化学反应释放出热能和光能,生成物氯化钠的质量要小于反应物钠和氯的质量之和。然而,这个反应过程中损失的质量只有几十亿分之一,太小了以至于无法觉察得到。所以学化学的学生可以声称在化学反应中质量是守恒的(在他们可以测量的范围内)。

核反应转化的质量比化学反应多得多,可以用百分数来计量。化学反应涉及的是电子,电子是原子世界里的轻量级粒子;而核反应涉及的是包含原子质量的99.9%的原子核。在后面将要讲到的铀核的裂变中,损失的质量大约是总质量的1‰。尽管这个数字看起来似乎很小,但由于 $E = mc^2$ 中的 c^2 是一个很大的数值,所以这个反应释放出来的能量是相当可观的。

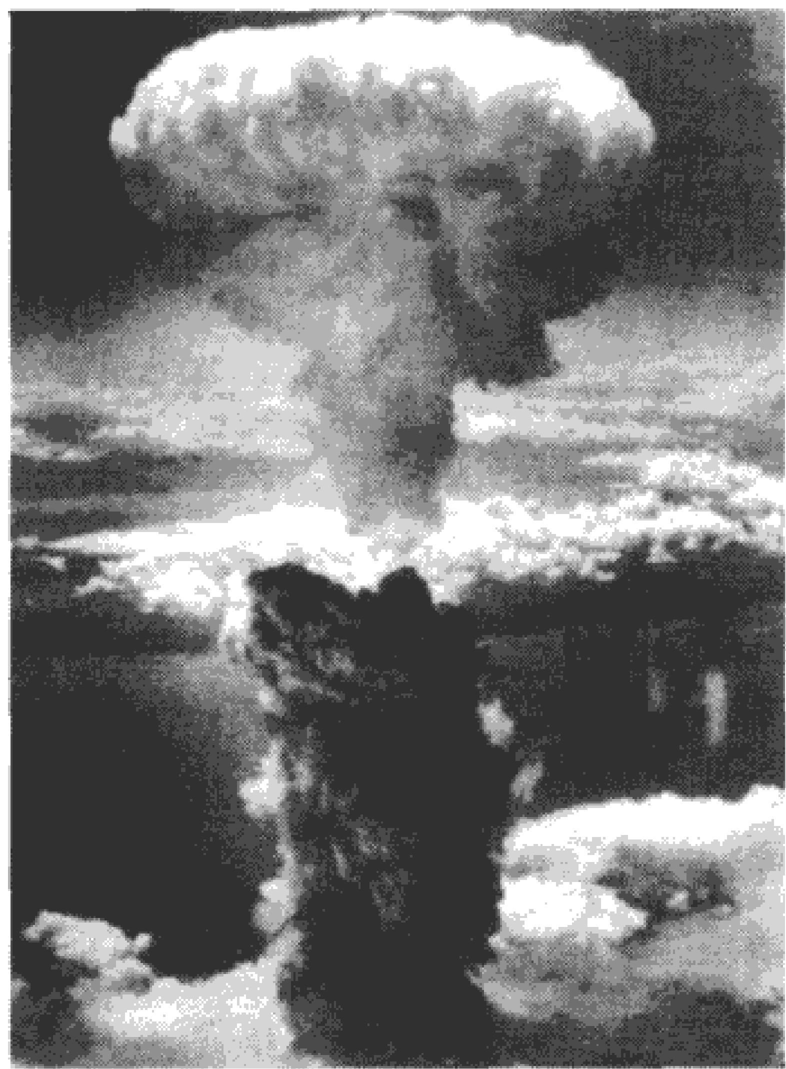
1—3 个中子,平均每次裂变产生 2.5 个中子)。当几个中子撞击像铀 235 和钚 239 这样重的原子核时,会诱导一些原子核发生裂变,裂变过程生成更多的中子,这些中子又进一步诱导更多的原子核发生裂变反应。这样一来,链式反应发生了。让参与曼哈顿计划的物理学家既高兴又害怕的是,一颗毁灭性的炸弹就这样诞生了。

链式反应对参与反应的物质有一个最小量的要求。如果只有少数原子核发生裂变,那么只能生成很少量的中子,反应只会"噼啪"一声就熄灭了而无法继续下去。临界质量是维持链式反应所需的物质的最小质量。对铀 235 来说,临界质量大约是 114 磅(507 牛)。

1945 年 6 月 16 日,在新墨西哥州阿拉莫戈多附近的沙漠中进行的核试验中,第一枚原子弹爆炸成功了。这枚原子弹采用钚 239 作为原料,释放出来的能量大约相当于超过 2 万吨高爆性化合物三硝基甲苯(TNT)爆炸时产生的能量。原子弹的发明没来得及在与德国的战争中派上用场(德国 1945 年 5 月 7 日已经投降了),但因为日本

拒绝投降,第二次世界大战还在继续。美军和它的盟军面临着登上戒备森严的日本本土作战的选择,这意味着要牺牲数百万的生命——包括双方的士兵和日本的无辜平民。出于避免这样一场浩战的渴望,美国往日本投下了两枚原子弹。第一枚于1945年8月6日落在了日本城市广岛,爆炸的能量相当于大约1.3万吨TNT。这枚原子弹采用的原料是铀235。第二枚原子弹与新墨西哥州核试验中使用的那枚类似。这一枚原子弹的计划目标是日本小仓市,但由于小仓被上空的云层笼罩住了,所以最终于1945年8月9日落在了日本城市长崎。这两枚原子弹在瞬间杀死了10万余人,使成千上万的人身受重伤,很多人后来因伤死去。日本在1945年8月14日投降了。

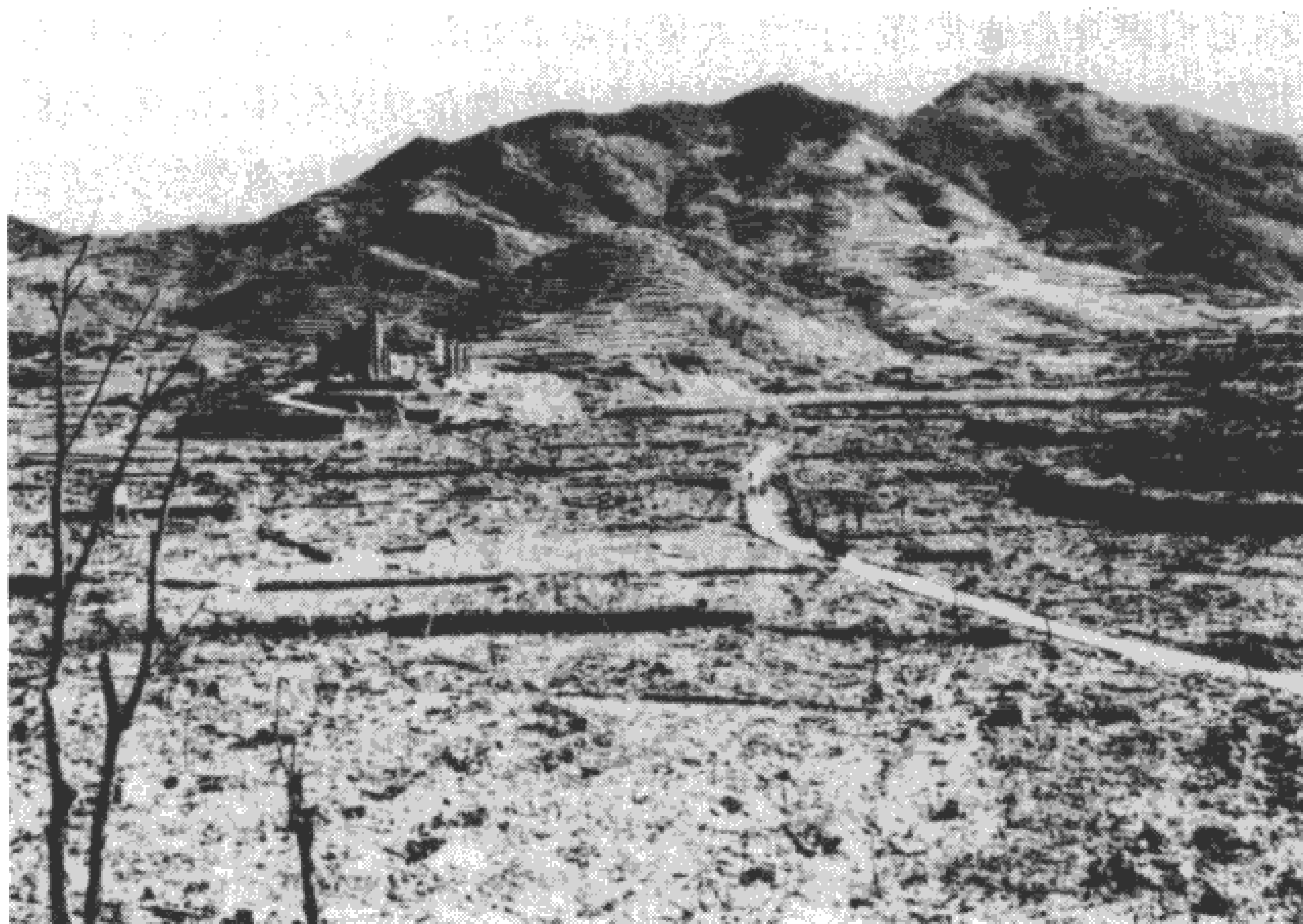
原子弹带来了第二次世界大战的结束,但它同时开启了一个军队拥有可怕力量的时代。20世纪40年代末开始的冷战一直持续到80年代末,从第二次世界大战中崛起的两个最强大的国家——美国和苏联在势均力敌的状态下对峙了几十年。尽管两个国家曾经在第二次世界大战中并肩作战,但不同的政治意识形态、不同的政体,让它们在战后成了敌人。两个国家都在自己的军库中囤积了可怕数量的核武器。



第二次世界大战期间的1945年8月9日,一枚原子弹落在了日本长崎。6万英尺(1.83万米)的柱状烟尘显示了这枚原子弹的强大破坏力。(国家档案署)

基于裂变反应的炸弹并不是军火库中唯一的一种。第二次世界大战结束后短短几年,美国物理学家就开发出了基于聚变反应的炸弹。聚变是一种和裂变相反的核反应过程,即几个小的原子核结合成一个较大的原子核。例如,氢的一种同位素氘(氢2,和正常的氢原子一样含有1个质子,但多了1个中子)可以聚变成一个氦4原子核。和裂变一样,聚变反应也释放出巨大的能量,而且能量产生的原因也是一样的($E=mc^2$)。按百分比来计量,聚变甚至比裂变损失了更多的质量;例如,当氘和氢的另一种同位素氚(氢3,包含1个质子和2个中子)发生聚变时,生成氦4和1个自由中子,初始质量的大约3‰转化成了能量。基于聚变反应的炸弹被叫做"氢弹",因为是氢原子为爆炸提供了燃料。

美国、苏联以及法国和英国等其他一些国家都竞相开发更具杀伤力的炸弹,进行了



原子弹给日本长崎带来了极大的破坏。（国家档案署）

很多的核武器试验。1961 年苏联试验的一颗炸弹是迄今为止威力最大的核武器，这颗炸弹的 TNT 当量为 5 000 万吨，其杀伤力是摧毁广岛的那颗原子弹的近 4 000 倍。这颗在北极圈试验的炸弹被称为“炸弹之王”。冷战双方不断开发出射程越来越远、精准度越来越高的导弹，并互相瞄准对方。为了防止任何一方恣意使用这些可怕的核武器，出现了一个带有黑色色彩的古怪概念，这就是 MAD——相互确保摧毁，在任何涉及核武器的战争中双方都将同归于尽。

今天，随着苏联的解体，造成冷战的政治紧张局势已经有所缓解，但核武器依然存在。截至 2006 年 5 月，公开承认拥有核武器的国家有 8 个：美国、俄罗斯、英国、法国、中国、印度、巴基斯坦和朝鲜。此外，以色列被怀疑拥有核武器，乌克兰（曾是前苏联的一部分）也可能拥有核导弹。许多国家都签署了《核不扩散条约》，意在限制这些危险武器的蔓延和开发。尽管如此，很多人还是担心，一旦某个小国家或者一群穷凶极恶的恐怖分子获取了核能力而又失去克制，将酿成大祸。如果核武器落于冒险的军国主义的领导人之手，后果将不堪设想——不仅仅因为它们恐怖的杀伤力，还因为它们持久的辐射能力，这就是辐射尘。

辐射来源于自发放射活动或诱发的核反应。前面提到过，少数几个放射性原子发出的射线并不危险，但如果剂量较大，则有可能造成死亡或杀伤。不管炸弹是基于聚

变还是裂变，它们爆炸后通常都会产生大量不稳定的原子核，这些原子核要继续发生衰变，半衰期从几秒钟到数千年不等。这些原子核散布在空气中，随风漂移，附着到微尘颗粒上，而且通常都能运行数英里，最后落到地面上，污染所有暴露的表面。当人体暴露在辐射当中，由于辐射的电离作用使 DNA 发生突变，就会导致更多癌症的发生。

1954 年，美国在太平洋中的一个小珊瑚岛比基尼岛进行名为 BRAVO 的核爆炸试验时，发生了这样一场惨剧。爆炸超过了原来的预期，其强度竟然超出广岛原子弹的 1 000 倍。附近岛屿上的居民暴露在严重的辐射当中，出现了呕吐、腹泻和烧伤等症状。很多孩子数年之后都罹患了癌症。尽管美国政府后来承认了错误并为当地居民提供医疗服务和各种补偿，这次灾难还是付出了太沉重的代价。

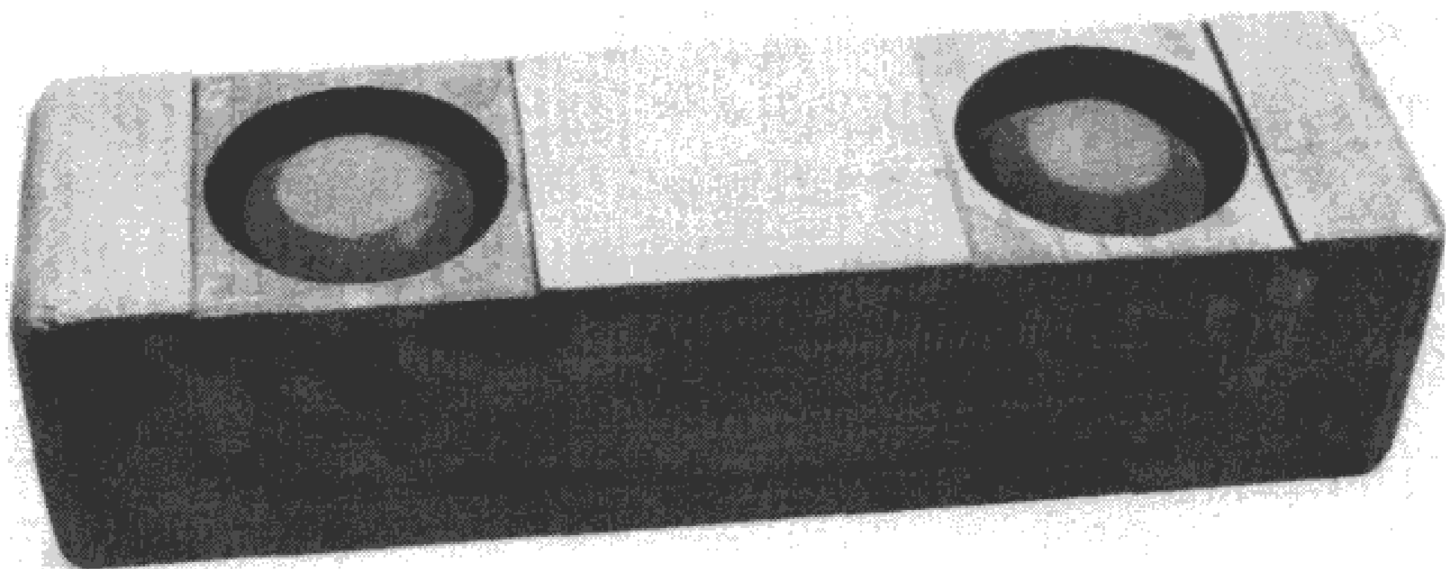
核武器酿成的灾难甚至可以在全球范围内影响人们的生活。如果发生世界大战，大量炸弹同时爆炸的话，掀起的尘埃和炸弹碎片足以遮挡住阳光，而且将持续数月甚至数年之久。除了辐射尘可以杀死数百万人之外，由于缺少太阳能，地球将经历大降温。在地球演化的历史上，类似的降温过程是由陨星撞击地球引起的，其后果就往往是导致大量物种的灭绝。

核能

核武器带来的梦魇使人们对核能这个概念有了清醒的认识。根据国际原子能机构的数据，当今世界上电能的大约 16%是由核能来提供的。

核反应堆是生产电能的设备，其原理和其他类型的发电站一样，都是把从其他能源中提取的能量转化为电能。能量可以来源于化学能，例如煤、石油和天然气的燃烧，也可以来源于瀑布、风和阳光。核反应堆中的能量则来源于原子核，与制造恐怖爆炸的能量出自相同的地方。然而，核反应堆在应用爱因斯坦的质能方程（$E=mc^2$）时显得更为和缓，也更有控制。

以一种有控制的方式来提取能量实际上正是有机体在消化食物时所做的事情。食物中碳水化合物和脂肪的代谢产生一定量的能量。当把这些物质放在炉子里燃烧时，这个过程进行得更快，释放出热能和光能。有机体的消化系统提取的是相同的能量——储存在食物分子的化学键中的化学能，但发生在有机体中的这个过程更和缓也更有控制。有机体一点一点地分解食物分子，释放出来的能量被机体内的储能分子获取，这些分子通常是三磷酸腺苷（ATP）。ATP 分子的化学键中储存的能量为地球上所有有机体的大部分细胞活动提供着动力。



位于伊利诺伊州的阿尔贡国家实验室在 1942 年建造了第一个核反应堆。这张照片显示了作为燃料的核物质:放在石墨(碳)块中的氧化铀小球。(阿尔贡国家实验室)

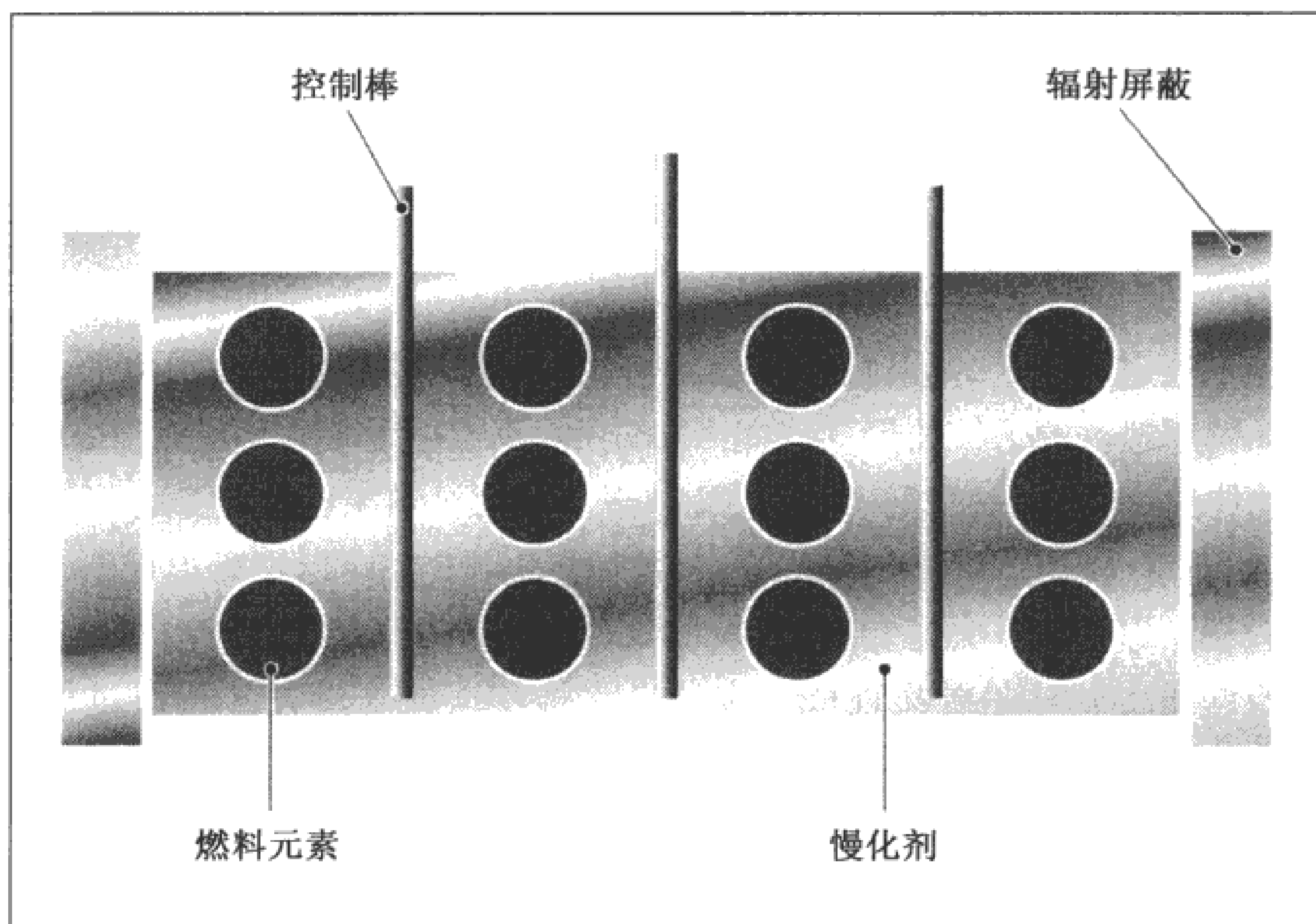
核反应堆通过不稳定的放射性同位素的缓慢而稳定的裂变来生产电能。大多数反应堆采用铀做原料。原子核的聚变也能产生能量,而且在很多方面还优于裂变反应,尤其是聚变的原料(例如水中的氘)既便宜又丰富。尽管科学家已经制造出了基于聚变反应的炸弹,目前却还没有可运作的聚变反应堆,因为聚变反应特别难以控制。物理学家和工程师们正在想办法解决这个问题,在本章的后面部分我们将会详细讨论这一点。

裂变反应堆的目标是要实现核反应的自我维持。这个过程必须通过原子核的裂变源源不断地提供能量,和导致原子弹爆炸的链式反应一样,裂变是由中子诱导的。然而,在反应堆中,为了使反应以稳定的速率进行下去,只能允许裂变产生刚刚足够的中子。为了达到这一点,裂变产生的中子数目应该刚好等于正在经历裂变的原子核吸收的中子数目。如果每个经历裂变的铀核平均产生出一个中子,而这个中子刚好被接下来发生裂变的一个铀核吸收,那么这个过程就能自我维持,且不至于失去控制跑火爆炸——因为没有多余的中子。如果在一个核反应过程中,每次裂变平均产生的中子数不足一个,那么这个反应过程最终是要熄灭的。所以,一个稳定的核反应需要的中子数只能为 1,不能多也不能少。

然而,铀裂变是一个自然过程,它是不会主动服从于人类的工程目标的。前面提到过,铀 235 的每次裂变平均产生大约 2.5 个中子。因此,反应堆必须有一种机制来防止多余的中子引发更多的裂变反应。控制棒就是用来实现这一目的的,控制棒插在反应堆的堆芯中——裂变反应进行的地方。后图是一个反应堆堆芯的示意图。控制棒由镉和硼等能够吸收中子但不发生裂变的材料做成。通过调整堆芯中控制棒的数目和位置,就可以有效地控制自由中子的活动。当活动过弱时,抬高控制棒的位置或者把控制棒去掉,这样被吸收掉的中子数就减少了,反应速率就会随之增加;如果活动

过强，只要采取相反的操作就能使反应速率降低。

反应堆堆芯里的另一个问题就是如何对中子进行减速。快速运动的中子不太容易被用作反应堆燃料的铀的同位素（铀 235）吸收，然而，裂变中生成的中子通常都相当活跃。让中子减速的工作是由慢化剂来完成的，许多反应堆采用水作为慢化剂。中子撞击水分子后不被吸收，但速度减降下来了，这样它们就更容易被铀 235 的原子核捕获掉。



这张反应堆堆芯的切面图显示了发生裂变的燃料元素、慢化剂、可调节的控制棒以及用来吸收游离射线的核屏蔽。

要为中子减速的另一个原因是，铀的另一种同位素铀 238 能够吸收大量的快速运动的中子，但却极少发生裂变反应。铀 238 是核反应的一个累赘，我们不得不考虑它是因为天然铀矿中大约 99%是铀 238，而铀 235 的含量却不到 1%。和不同元素不一样，同一种元素的不同同位素是很难分离开来的，铀的同位素也不例外。对大多数反应堆来说，铀 235 的含量必须达到 3%—4%才可以用作核反应的燃料，即便是要达到这个纯度，那也是相当困难的一件事情，必须根据两种同位素在质量上的细微差异来将它们分离。

从裂变中获得的能量来自产物质量的损失（$E=mc^2$），但这种能量并不以电能的形式存在，而是热能和辐射。在反应堆里，热能把水变成蒸汽，蒸汽产生的巨大压力转动涡轮，产生通过感应产生电能所需要的相对运动。根据国际原子能机构的数据，截

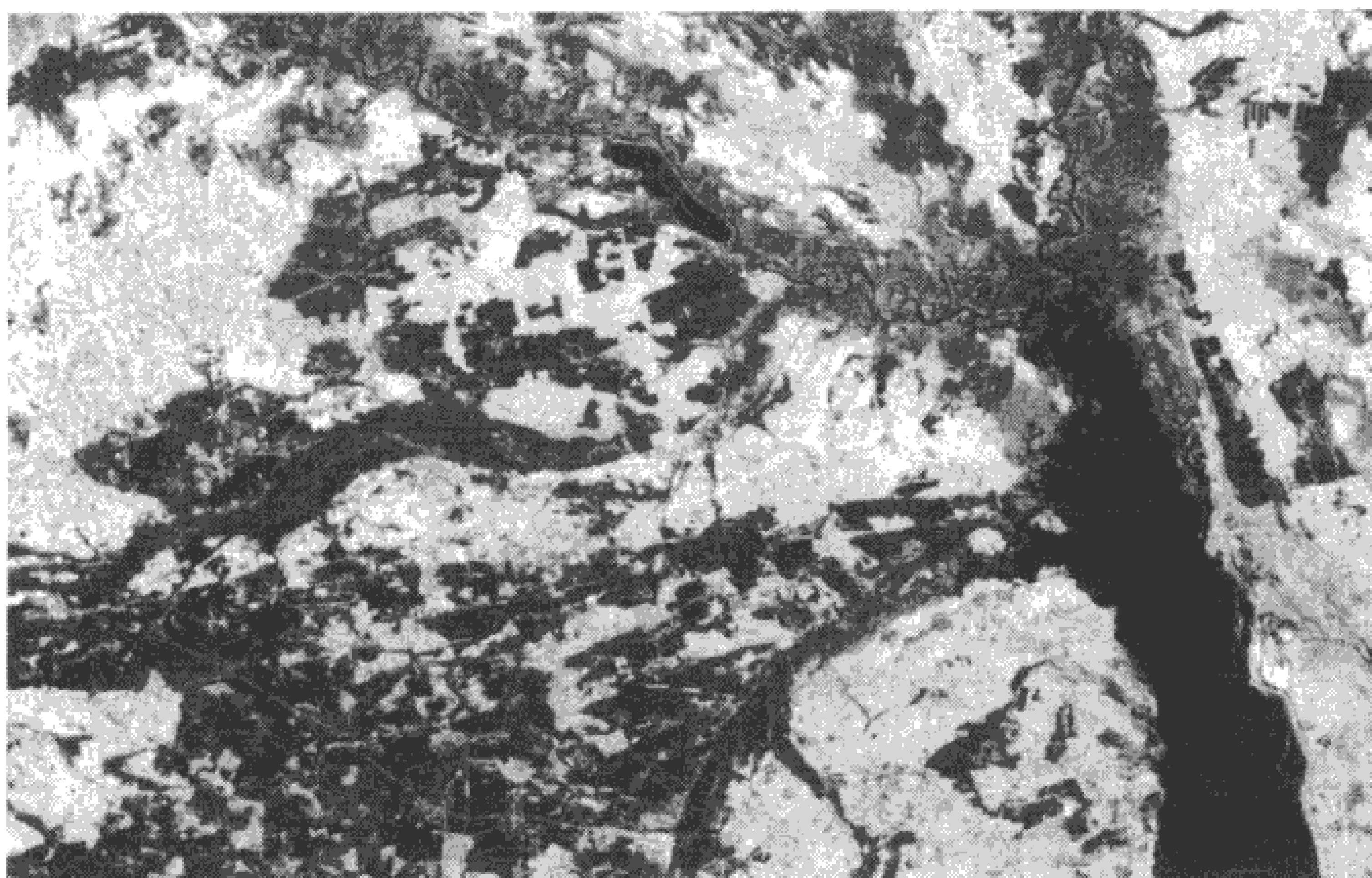
至 2002 年,世界上共有 441 个正在运作或建造中的核反应堆分布在 32 个国家。其中,有 104 个位于美国,生产的电能大约占全国电能的 20%。

裂变只使用很少量的燃料就可以生产出巨大的能量——这是它的优点。它的缺点就是有时候可能很危险。当然,在反应堆里发生像原子弹那样的核爆炸是不可能的。这样的爆炸需要聚集大量的可裂变物质,这在反应堆里很难实现。反应堆最严重的危险是受热之后遭到破坏,从而释放出放射性物质。如果有太多的中子在堆芯里四处游荡,反应堆就容易过热,一个可能的后果就是使堆芯熔化。温度可以飙升至数千度,足以熔化任何物质。尽管核反应堆受到厚铅板等可以阻挡辐射的材料的屏蔽保护,一次灾难性的熔炉还是会释放出大量的放射性原子核。控制棒可以防止过热,但它们需要时间来发挥作用。在发生事故时,往往由后援系统来迅速关闭堆芯。

如果把世界上反应堆的数量和它们服役的时间考虑进来的话,反应堆的事故率是很低的。1954 年在苏联出现了第一个商业化的反应堆,1957 年,在美国的第一个商业化运营的反应堆建于宾夕法尼亚州的码头市。从那个时候算起,1979 年发生在三里岛反应堆的事故是美国迄今为止最严重的一次核事故。这个反应堆位于宾夕法尼亚州的萨奎哈纳河中央,当时一个循环水泵发生故障,导致反应堆局部熔化。尽管反应堆由控制棒关闭,但由于之前裂变产生的放射性物质继续辐射能量,冷却水的缺乏导致堆芯过热,少量的放射性物质泄漏出来。尽管不足以造成很大的危害,但这次事故还是在附近居民包括宾夕法尼亚首府哈里斯堡的居民中引起了一些恐慌。

1986 年 4 月 26 日发生在乌克兰切尔诺贝利核反应堆的事故是到目前为止所发生的最严重的一次核事故。事故起因于操作员在测试制冷系统时,抽出了大量的控制棒。当制冷系统被关闭时,控制棒本应该被自动插入堆芯以使反应停止,然而,由于操作员违反了操作规程,堆芯很快就过热了,这时操作员试图手动移动控制棒来使反应停止,可惜已经太晚了。裂变速率急剧上升,堆芯被熔化了。蒸汽和化学爆炸发生了,大量的放射性原子核被送到了空气中。30 余人在事故现场死亡,更多的人因为受伤被送往医院。放射性物质扩散到了斯堪的纳维亚半岛和东欧的大部分地区,迫使成千上万的人为逃离污染而背井离乡。后果还不仅如此,由于辐射过重,多少人因此患上癌症和其他疾病,这是个难以预测的数字。

核能引起了人们的很多关注。不仅仅核事故能产生大量的有害的辐射,核反应堆中的燃料即使已经物尽其用,不能再用来发电时,它的放射性还能持续数百年。这些放射性"垃圾"必须密封起来,填埋到地下储存很多年。即便这样,容器仍有可能发生腐蚀,释放出放射性物质,这使得很多人因为家园附近有个核垃圾的填埋场所而感到惴惴不安。



这是 1994 年从“奋进”号航天飞机上拍摄的切尔诺贝利的雷达图像。图的中央和顶部中间的狭长黑色形状是切尔诺贝利核反应堆长达 7.4 英里(12 千米)的冷却池。池的左边是反应堆和建筑物,池的右下方沿着普里比亚特河是切尔诺贝利市。1986 年 4 月 26 日事故发生后,苏联政府紧急疏散了 10 多万人。(NASA-JPL)

美国早在 20 世纪 80 年代初期就停止了核反应堆的建造,但许多其他国家仍把核能看作是石油、煤和天然气等的最好替代能源。这些碳氢化合物是常规燃料,它们燃烧时会产生大量的温室气体,温室气体被怀疑是全球变暖的罪魁祸首。相比之下,核能则极少产生温室气体。在 2002 年,法国全部电能的 78%来源于核能,比利时 57%,瑞典 46%,即使是乌克兰这个曾经发生过最严重核事故的国家,它的电能的 45%也来源于核能。尽管世界上铀 235 的储量有限,不能再维持很长时间了,但只要它还没有被用完,就总会有人相信核能的风险—效益比是值得乐观的。

核医疗学

核反应堆事故中释放的辐射具有电离能力,所以是危险的。前面提到过,电离作用将电子从原子和分子中剥离出来,形成离子。这些离子具有很强的反应性——新的化合物形成了,旧的化合物分解了。活的有机体尤其容易受到影响,因为电离作用能够损伤或者破坏 DNA 等重要的生物分子。一个细胞如果接受了太多的辐射就会死亡。

然而,辐射的电离作用也有好处。在医学上的某些情况下,医生希望病人体内的某些细胞死亡。其中一种情况就是针对癌症的治疗。

癌症有多种不同形式,并且可以攻击人体许多不同的器官和系统,但所有癌症有一个共同特征:它们都是没有控制的生长。生长对生命来说是必要的,对于幼小的尚需发展成熟的有机体来说尤其如此。生长对于成熟的个体来说也是必要的,因为机体的细胞和组织需要不断地得到更新。举例来说,人体内的红血球寿命很短,每个人一天平均要死亡约 10 亿个红血球。人体的红血球通过细胞分裂过程来得到补充——细胞长大然后一分为二,实现自我复制。细胞分裂是有机体生长、维持和修复组织及器官的正常途径。

所有这些细胞分裂都应该得到很好的控制和协调,只有这样,机体才会在需要的时间,在合适的地点生产出适当数量的细胞。当一群细胞或者单一一个细胞开始无休止地分裂时,癌症就慢慢形成了。细胞内部存在一些机制可以防止经常发生这种形式的细胞分裂,那些不听使唤地自我复制的细胞大多数都会死去。所以,很少有细胞能摆脱这些限制而没有控制地自我复制。如果有的话,这个细胞很有可能遭受了一系列基因突变,这些基因突变组合在一起让这个细胞得以绕过种种限制,这种事情发生的几率非常小。很不幸的是,像其他遗传因素一样,基因突变也是可以遗传的。细胞分裂过程需要复制细胞的 DNA,生成的两个姐妹细胞都得到一份完全相同的 DNA。对于一个癌细胞来说,这意味着突变被传递给了子细胞,这样,子细胞又可以没有控制地进行细胞分裂。像肿瘤这样的人体不需要的组织就是这样形成的。

在美国,癌症是导致人体死亡的第二大杀手。几十年前,癌症是如此可怕,以至于它的名字都不能被提起。今天,癌症仍然非常可怕,但由于医疗技术的改进,癌症病人已经有了存活的可能。治疗癌症需要杀死或者移除人体内的癌细胞,同时要尽量避免对正常组织造成损伤。杀死癌细胞的一种方法就是使用放射线。

大约一半的癌症病人接受了各种形式的放射治疗,或者单独使用,或者和其他医疗程序结合起来使用。通常,用于治疗的射线束来源于高能粒子和电磁辐射。在有些情况下,射线束只应用于机体表面,但更多时候需要在机体内部进行治疗。放射治疗对大部分固态肿瘤(异常生长的肿块)都有效,包括脑部、胃、肺和其他器官的普通癌症。治疗所需的射线剂量取决于癌症的种类、位置和病程等许多因素。对癌症及早作出诊断总是最好的;某些类型的癌症能够扩散至全身,如果发展到晚期,治疗起来就非常困难了。

这些医疗程序中使用的某些射线并不是来自放射源。在医疗中应用得很普遍的

X射线和γ射线通常是通过粒子加速器发射出来的，电子、质子和中子这些粒子本身也是由加速器产生的(本书的第三章将讨论到粒子加速器)。然而，很多治疗采用了钴60，这是一种半衰期略长于5年的放射性同位素。钴60是一种优良的γ射线源，而且通过用中子轰击自然钴(没有放射性)可以容易地得到大量的钴60。尽管钴60治疗会产生一些放射性垃圾(像其他核燃料一样，这种同位素在发挥医疗用途之后还具有放射性)，但对于没有加速器可用的医院和诊所来说，它还算一个相对便宜的选择。

放射治疗的目标是杀死癌细胞而不影响正常的细胞。但不管放射束的来源和性质怎样，它都不可能如医生所期望的那么精准。不可避免地，有一些健康的组织要受到损伤，但只要不是特别严重，大多数细胞都能通过某些机制来修复由射线造成的损伤。对病人来说，非常幸运的是，癌细胞的这些修复机制一般都不完善，所以它们更容易向射线屈服。然而，放射治疗总会带来一定量的副作用或者间接损伤。这些无意的损伤通常发生在由频繁分裂的细胞(和癌细胞不同的是，其生长和分裂仍处于控制之中)所组成的组织上面。常见的例子有毛囊细胞和血液、皮肤及肠中的细胞。这就解释了为什么放射治疗中经常出现脱发和恶心等副作用。

核医疗学这个术语有时仅仅局限于将某种放射性物质注射入人体内，而不包括在各种放射治疗中对外部放射源的使用。注射无疑是最直接的利用核活动来进行医疗的方法，但正如上面谈到的那样，放射性同位素即使在体外，也可以应用到各种医疗情境中发挥多种不同功效。

放射性同位素一旦被注射到体内，就能在疾病诊断(确定哪里出了问题)和治疗中发挥作用。诊断通常采用很少量的同位素，以避免辐射过多造成危害。治疗则采用更大的剂量，通常是企图杀死癌细胞。

医生在诊断某种疾病时经常需要对受感染的组织做仔细的检查。对于位于皮下的组织来说，要么进行手术，要么使用X光机或磁共振成像技术(MRI)来对组织摄像。X光机很适于对骨组织成像，但对软组织却不怎么有效。MRI，后面将会简略地介绍到，能提供许多器官的高质量图像，但有些时候，注入到体内的放射性同位素会有更好的效果。这些同位素一般被注射到静脉中，往往可以定位到机体的特定部位。医生使用专门的检测器来捕获由这些同位素发放的射线，从而对内部组织进行测量甚至得到它们的图像。这些同位素最终被机体的正常代谢过程慢慢消耗掉。

一个很常见的粒子就是甲状腺疾病的诊断和治疗。甲状腺是位于颈部的一个腺体，它分泌的激素对机体的生长和代谢有着重要作用。碘是甲状腺正常发挥功能所必需的一种元素，它会聚集在腺体内。医生巧妙地利用了这个特点，他们把碘131等放

射性同位素注入到体内,这些同位素会聚集到甲状腺中。有的时候也使用其他同位素。锝的同位素在各种核医疗中经常使用到。这是核医疗学中最古老的程序之一,20世纪50年代,当医生们还在学习放射的原理时就开发出了这个程序。这样的测试能够提供甲状腺不同部分的形状和活动等方面的信息。在治疗甲状腺癌时,则需要增加放射剂量。

放射性示踪剂在医疗实践和科学研究中都应用得很广泛。本章的开篇部分介绍了赫维西所做的一个早期实验,后来发展出了越来越多的利用放射性标记和追踪各种物质的方法。一个常见的例子就是正电子发射断层摄影术(PET),某些同位素在衰变时会发射出一个叫做正电子的粒子,PET技术就是利用这个原理来成像的。

MRI是对机体内部成像的另一种技术。MRI名字中表明的磁学特性来源于氢原子核,核物理对MRI技术很关键。这项技术原来的名字叫做核磁共振,后来“核”字从名字中消失了,部分原因是医务人员担心病人会把这项技术和辐射联系起来。MRI技术通过引入一个强磁场来排列机体内的氢原子,引入磁场的强度比地球本身的磁场强了约4万倍(所谓的场,就是力发生作用的空间区域。磁场就是磁力发生作用的区域)。氢原子核是一个质子,其行为表现有点像一根细小的条形磁铁。当病人处于磁场中时,体内的氢原子就会朝向一定的方向。低频的电磁辐射(无线电波)被用来定位体内的质子。MRI机器由此生成一张有关病人体内质子即氢原子核分布的地图。

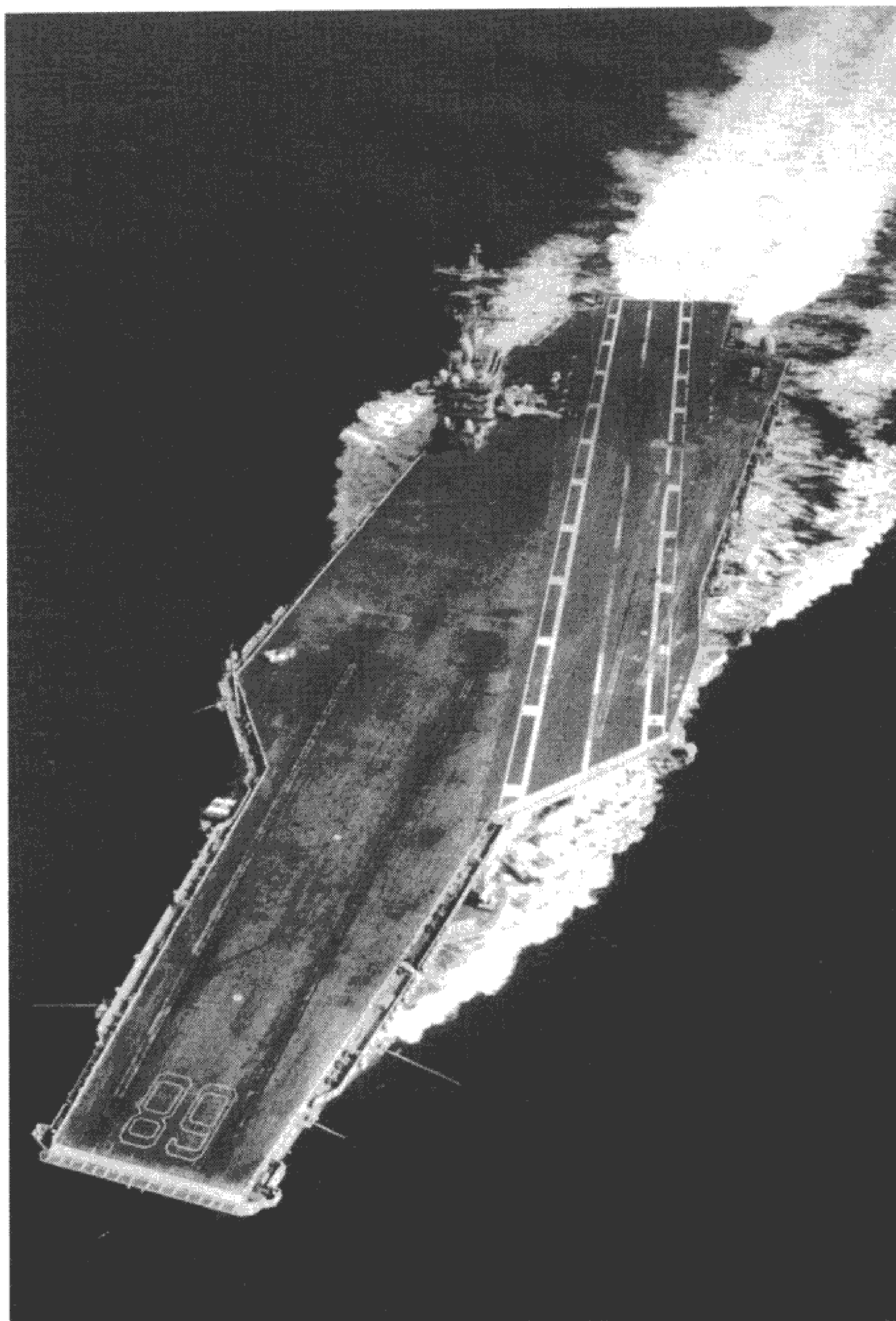
为什么氢如此重要呢?人体重量的大约65%是水,而每个水分子(H_2O)都包含两个氢原子。通过研究MRI信号的分布,医生通常能判断机体软组织(含水的组织)的健康状况。举例来说,脑部肿瘤的MRI影像可能会比正常脑组织更亮或更暗(取决于肿瘤本身以及MRI扫描的类型)而且可能会有不同的纹理。

核动力宇宙飞船

人们已经从原子核中获得了炸弹、电能和医疗方法。现在,人们希望这个微小的能源库可以把宇航员带往其他星球。

把核能应用于运输已经不是一件新鲜的事情。世界上第一艘核动力潜艇,美国军舰“鹦鹉螺”号于1955年下水。1958年,这艘舰艇在北极冰帽下进行了一次历史性的航行,这在美国海军核潜艇中尚属首次。一些现代化的水面船舰也配备了依靠核反应堆来工作的发动机。

促使核动力潜艇发展的重要原因是对更长潜水时间的渴望,就像“鹦鹉螺”号进行



美国军舰“尼米兹”号航空母舰由核能提供动力。这些舰船无需补给燃料就能运行长达 25 年。(美国海军)

北极航行所需要的那样。潜于水下的舰艇也可以更好地隐蔽起来而不容易被敌人发现。旧式潜水艇配备的是柴油发动机,然而这些内燃机是需要空气的。当这种潜艇进行水下航行时,需要配备功能有限的大块电池,这些电池并不能维持多长时间,迫使潜艇不得不经常浮出水面。

然而,核潜艇就没有这种限制了。像建在地面上的核电站一样,核潜艇有一个反应堆用来给水加热,制造出蒸汽,然后转动涡轮。涡轮的转动使螺旋轴发生旋转,推动潜艇在水中穿行。反应堆也会生产出电能,供给潜艇上的设备和像氧气循环机这样的生命维持系统使用。只要潜艇上的食物供应和船员的毅力跟得上,今天的核潜艇可以在水下潜伏任意长的时间。

20 世纪四五十年代,在美国有过一次设计和建造核动力飞机的尝试。装备有核动力引擎的飞机能够在空中停留数周至数月之久,因为它可以从相对少量的物质中获取巨大的能量,而不需要反复补充既沉重又不耐用的汽油。工程师花了几十亿美元,为飞机提供了一个设计方案并制造出了几个发动机原型。他们为测试空中反应堆进行了多次飞行试验,但从没实现过真正的核动力飞行。这个计划最终由于安全方面的考虑而被终止了。一方面,反应堆所需要的屏蔽非常沉重,另一方面,人们对飞机失事后可能造成的辐射污染表示忧虑。

对核动力推动的担忧并不是没有根据的。1961 年,苏联核潜艇 K-19 上的反应堆发生了一次悲剧性的事故。当这艘潜艇在远离港口 1 500 英里(2 400 千米)的海上航行时,在反应堆中运送冷却剂的一根管道突然出现了泄漏。接着,过热发生了,眼看着就要熔炉了。船员进到反应堆里面才阻止了更严重事故的发生,然而他们自己却遭受了致命剂量的辐射。英勇的船员成功地阻止了熔炉,付出了 22 条生命的代价(8 人在几天内就死去了,剩下的 14 人在接下来的几年里陆续死去)。另一艘苏联潜艇把K-19拖到了港口,工人们为它清除污染。这些事件为 2002 年的电影《K-19:寡妇制造者》提供了背景。

几年后,苏联海军让 K-19 重新服役,这次事故被保密了很多年。然而,事故并不仅仅只有这一次,有超过半打的核潜艇的壳体躺在海洋的底部。心存疑虑的人们还在担心跟随潜艇一同沉入海底的核反应堆可能带来的危害,但潜艇专家并没有这种顾虑。反应堆被厚厚的一层材料屏蔽着,放射性燃料本身也用耐海水腐蚀的保护性合金包装起来了。测量也表明,在残骸附近的区域最多只残留有极少量的辐射。

考虑到可能的危险,人们自然会对使用核能来发射宇宙飞船感到忧虑。以前

的所有发射都使用某种或固态或液态的化学推进剂来满足宇宙飞船对能量的巨大需求。

化学推进的一个很大的问题就是燃料的质量。火箭和宇宙飞船不仅要装载可燃物，还要装载支持它们燃烧的氧气，因为飞船要在高空的稀薄大气甚至太空的真空中运行。火箭的燃料是很重的，例如，航天飞机发射时需要几百万磅的燃料。火箭和宇宙飞船本身也很重，因为它们要承受高速运动和加速所造成的冲击，所以必须建造得很坚固。当把各种设备装上去之后，在载人发射中还要加上宇航员，整个系统就变得非常庞大。

使用化学燃料来发射火箭是非常昂贵的。牛顿运动第二定律指出物体运动的加速度 a 等于作用力 F 除以这个物体的质量 m：

$$a = F/m\,.$$

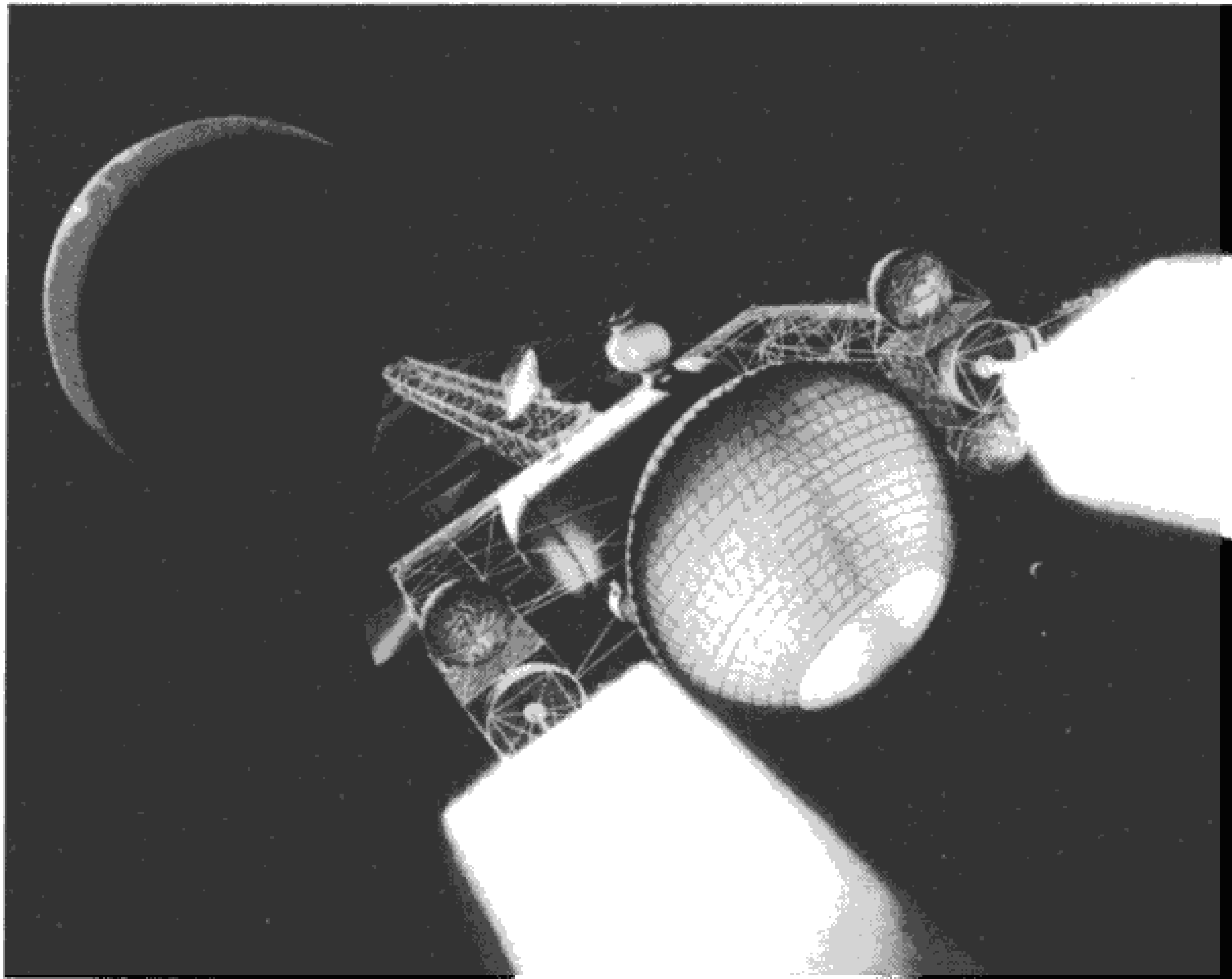
当 m 很大时，除非 F 也很大，否则 a 就会变得很小。按照牛顿的看法，要加速一个很重的物体需要很大的作用力。

强大的地心引力使情况变得更为糟糕。火箭只有逃脱地心引力才能到达太空，为了达到这个目的，所需的最小速度叫做逃逸速度，在地球表面附近，这个速度约为 6.9 英里/秒(11.2 千米/秒)，接近 2.5 万英里/小时！要有足够大的推力才能使质量很大的火箭达到这个速度。20 世纪 60 年代末、70 年代初，把宇航员送上月球的“土星五号”火箭的发动机功率达到数百万马力，当发动机开动时，产生的能量足以造成一次微型地震。

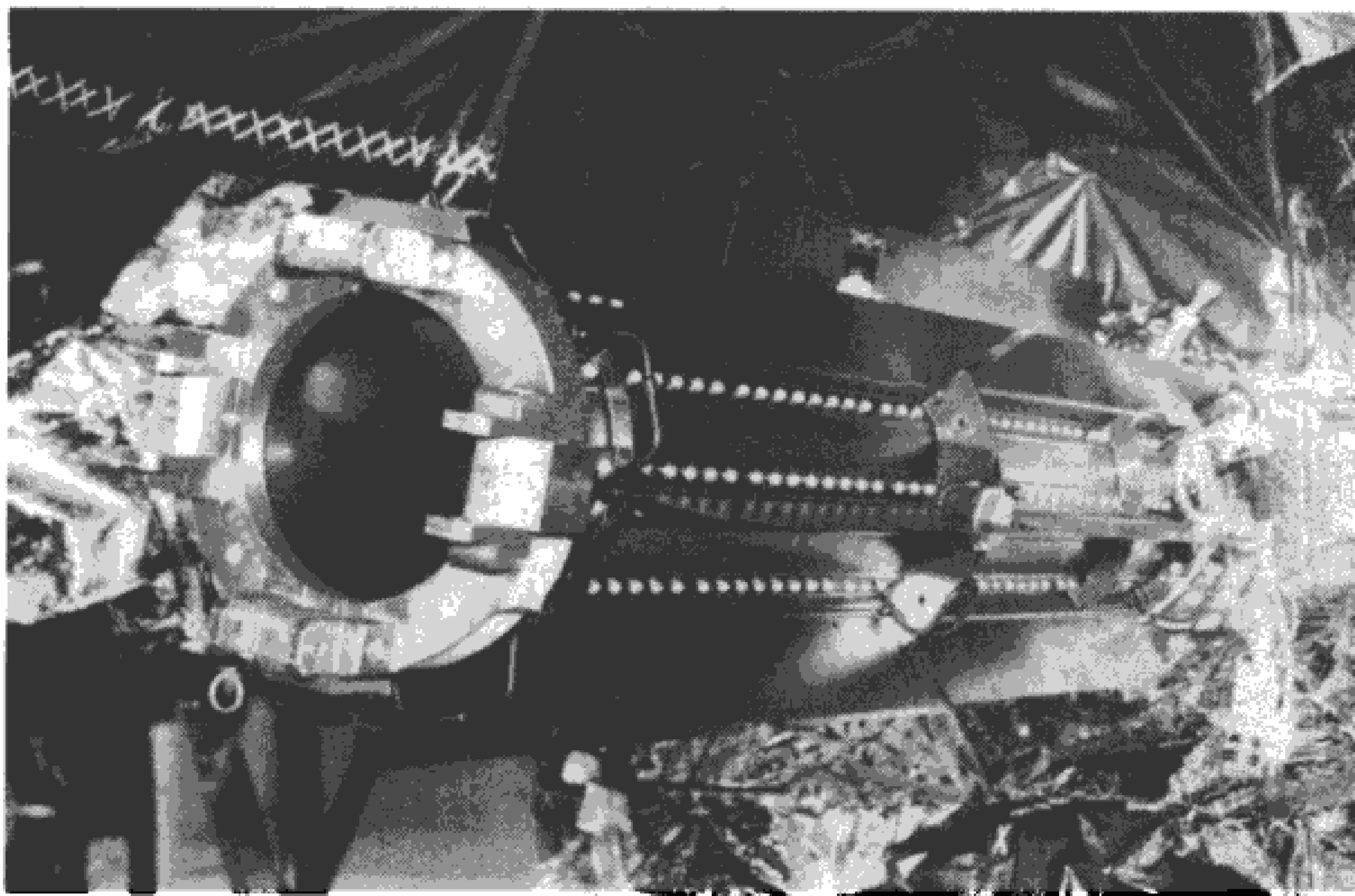
核能的优势是很明显的。几盎司的核燃料里蕴含着巨大的能量，这对航天发射来说是非常理想的。使用核燃料推动火箭使之挣脱地心的引力，相对来说，是比较容易也比较廉价的。

曾经有好几个计划试图设计出使用核动力的宇宙飞船。20 世纪 50 年代的“猎户”计划的目标就是建造一艘由一系列原子弹来推进的飞船。到了 20 世纪 70 年代，负责太空探索的美国政府机构国家航空航天局(NASA)尝试了另一个同样雄心勃勃的计划，那就是“核动力引擎火箭推进系统应用”计划(NERVA)。最终，这些计划都没有成功。

然而，NASA 并没有放弃这个想法。目前，NASA 有一个名为“普罗米修斯核系统和技术”的计划(普罗米修斯是希腊神话中为人类盗取天火的神)，试图开发基于太空的核能资源。这个计划主要关注两个应用：放射性同位素发电和核裂变反应堆。

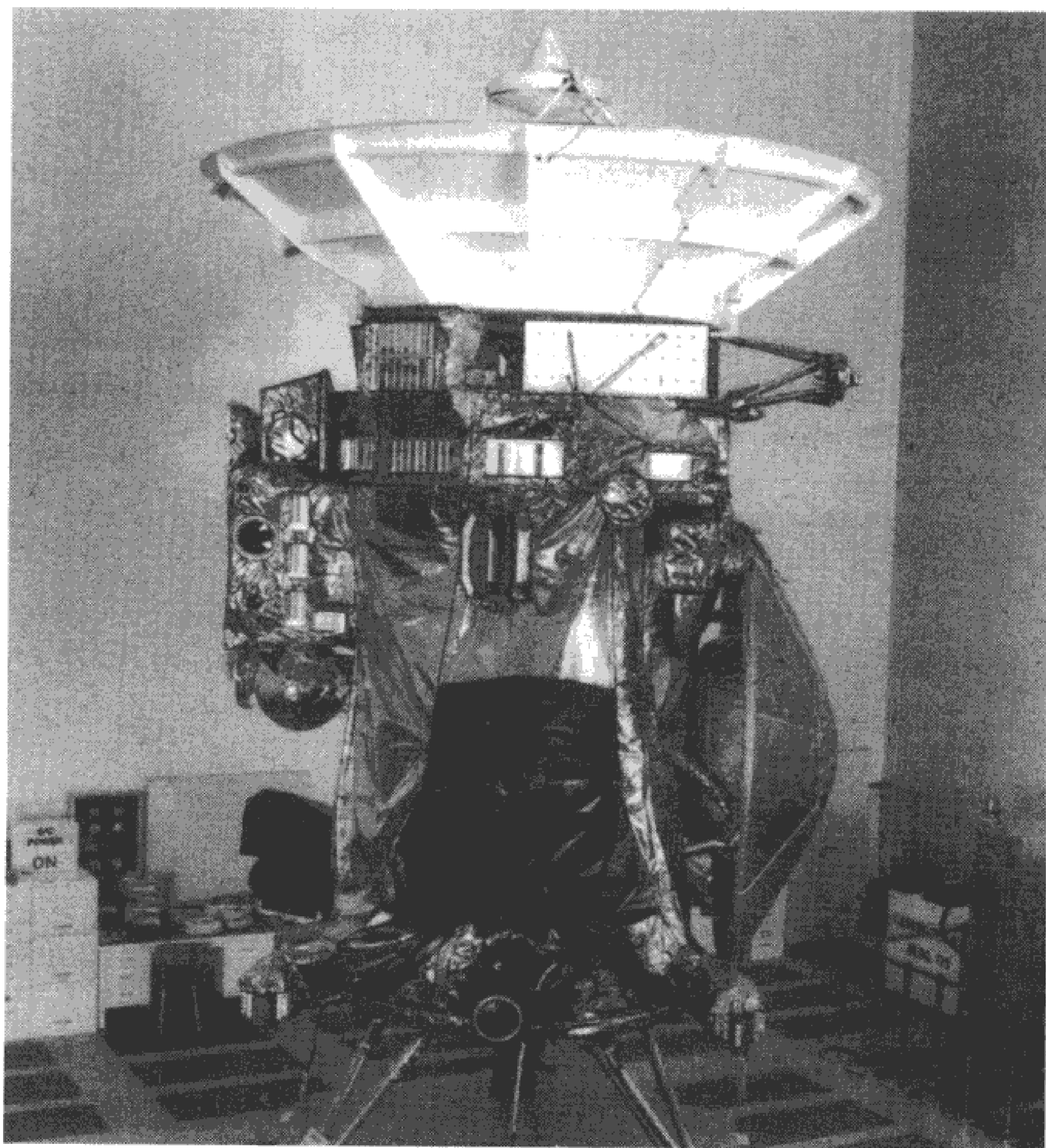


一艘核动力宇宙飞船可以在几个月内到达外层空间的星球上,而使用其他推进方法则需要几年时间。(NASA/帕特里克·罗琳)



这个放射性同位素热电发电机是为NASA的“卡西尼”探测器提供电能的3台设备之一。这些机器可以将钚238的二氧化物放射性衰变释放的热能转化为电能。(NASA-KSC)

放射性物质已经被应用到了太空探测器中，但所使用的量相对较小，还不足以用来推进飞行器；放射性物质仅被用来为探测器上的仪器提供能量。探测器上的一个装置可以把钚 238 衰变释放的热能转化为电能，产生足够的电流来维持探索器上的电学设备的运转。太阳能是太空中的优良能源，许多探测器都很好地利用了太阳能，但对于那些需要远离太阳深入到太阳系的外层空间的飞行器来说，太阳能就不再是个好的选择了。虽然从那些遥远的轨道例如木星和土星上看，太阳还是相当明亮的，但它已经不能为饥渴的宇宙飞船提供很多能量了。钚衰变的速率很慢，能够持续很长时间，



前往探索土星及其卫星的“卡西尼”号探测器发射于 1997 年 10 月 15 日，由于远离太阳无法有效利用太阳能，探测器使用核能发电来满足对电能的需要。

而且质量也很轻。20 世纪 70 年代的"海盗"号探测器和近期的一些探测器如"伽利略"号和"卡西尼"号,都携带了钚以满足电能的需求。

然而,总有些人不高兴。开往土星去的"卡西尼"号在美国宇航局、欧洲宇航局和意大利宇航局的合作努力下,于 1997 年发射升空。由于探测器上携带了比较多的钚[约 72 磅(320 牛)],结果引起了一些民众的抗议。他们的担忧可能是源于对钚的同位素的混淆。钚 239 是核武器的常见成分,但"卡西尼"号探测器携带的同位素是钚 238,这种同位素发射 α 粒子并不怎么危险。NASA 的计算表明,即使在最坏的情况下,"卡西尼"号也只会带来很小的完全可以接受的风险。

然而,民众并不总会相信宇航局给出的保证,他们的质疑有一定的历史根据。NASA 的航天飞机曾经发生过几起灾难性的事故,1986 年"挑战者"号爆炸,2003 年"哥伦比亚"失事,这些事故都让人们相信航天行动还是很危险的。在探测器上使用少量像钚 238 这样的表现良好的放射性同位素来发电是一回事;在火箭尾部安装一个强大的裂变反应堆是相当不一样的另外一回事。用核动力来推进宇宙飞船在技术上是完全可行的,宇航局需要做的是,在将飞船放到放射台上之前要让民众相信飞船是安全的。

聚变:未来的核能

太阳和其他星体与核潜艇一样是从核反应中获得能量的。但对天体来说,核反应过程不是把原子拆开,而是把原子结合起来。星体的能量来源于聚变。

聚变相对来说比裂变释放出更多的能量——当氢的同位素发生聚变时有 3‰的质量转化成能量,结果生成一个略轻的氦核。爱因斯坦的质能方程 $E=mc^2$ 在这里同样适用,所以这个反应释放的能量将使炸弹发出巨响。

由于电荷之间的相互排斥,如果想让质子和带正电的原子核聚合到一起,唯一的办法就是把它们加热到非常高的温度。人们通常认为温度是冷热的标志,但在原子水平,温度是物体内部原子和分子运动快慢的一种度量。灼热气体中的原子和分子以极快的速度上蹿下跳,而炽热的液体或固体中的原子和分子在剧烈抖动,结果使物体膨胀了。这就是热膨胀,老式的液体温度计正是利用了这一原理——较热的温度使液体膨胀而上升。当气体中的氢同位素达到一个足够高的温度时,它们就有充足的力量来克服电荷排斥力从而碰撞在一起。当它们靠得足够近时,强力就把它们捆绑起来,就这样,一个氦核诞生了。

星体中心的温度之高简直难以想象。这个温度没有办法直接测量得到，科学家不可能在那里插一根温度计。计算和理论表明，太阳中心的温度大约是 2 700 万℉（1 500 万℃）。

为什么会这么热呢？太阳是一个主要由氢和氦组成的巨大的气体球，它的体积比地球大 130 万倍，质量比地球大 33 万多倍。所有这些质量之间的引力作用以极大的压力挤压太阳的核心。这股能量加热了核心的气体，使其温度上升到能让氢核发生聚变的程度。聚变产生大量的热能和光能，以很高的速度向外发射粒子和射线；这种能量提供了一种与引力对抗的力量。像太阳这样的星体处于一种平衡的状态之中，一方面，引力试图把气体挤压成一个更小的球，另一方面，聚变产生的能量形成一种平衡力量使气体由内向外膨胀。太阳维持这种稳定状态已经有大约 45 亿年了，并且还将维持几十亿年。

在一个星体生命周期的更晚阶段，可能会出现其他的核反应，产生出比氦更重的元素。在所有这些核反应中，都有少量的质量转化成能量，像爱因斯坦的方程描述的那样。这意味着星体总在不断地减少质量，但由于 c^2 这一项数值很大，其质量的减小并不显著。对很多星体来说，这个过程终止于铁原子核——这种原子核非常稳定，进一步的聚变不仅不能释放能量而且还需要吸收能量。比铁重的元素并不是在普通的星体中生成的，而主要是在一种被叫做超新星的事件中产生的。科学家现在对超新星事件还没有很好的理解，在这种事件中，一颗巨大的星体在核活动的一片混乱中发生爆炸。爆炸产生足够的能量，使得各种重元素的原子核得以生成。本书第五章将更详细地讨论这些不可思议的事件。

星体聚变的很多方面都是令人惊叹的。地球和生活在地球上的有机体大部分都含有大量的重于氢和氦的元素，所以星体内部是锻造地球及其生命所需材料的大熔炉。包括人类在内的所有生物都是由在星体中“蒸煮”过的元素构成的。

太阳几乎供给了地球所需的所有能量，这些能量温暖了地球表面，驱动空气流动形成了风，为植物、最终为动物提供了生命的燃料。聚变是一种绝佳的能量来源，如果我们能在地球上利用它的话，世界上的大部分能源需求都能够便宜而又安全地得到满足。聚变的原料一点也不贵而且很充足，氢的同位素氘可以很廉价地从水中提取出来。而且与今天的核反应堆所利用的裂变反应不同，氢同位素聚变的产物是稳定的氦核（无放射性）。聚变反应堆的运作只需要更安全、更小量的原料，这也就降低了发生事故的风险。我们再也不能企求一种比这更好的能源了——这简直就像一场梦幻！

然而，这个梦想的实现却遇到了一些障碍。地球表面与太阳内部一点也不一样，

但聚变的发生却要求有和太阳内部相似的条件,否则它就不会发生。应用聚变反应的炸弹必须通过一些途径来再造太阳核心,这通常是由裂变核弹的爆炸来实现的。裂变炸弹先爆炸,把武器里氢的同位素氘和氚加热到数百万度的高温,只有到这时,聚变才开始发生。最后的结果是造出一个令人悚然的大火球和纷飞的放射性物质(大部分是起初的裂变反应的产物)。

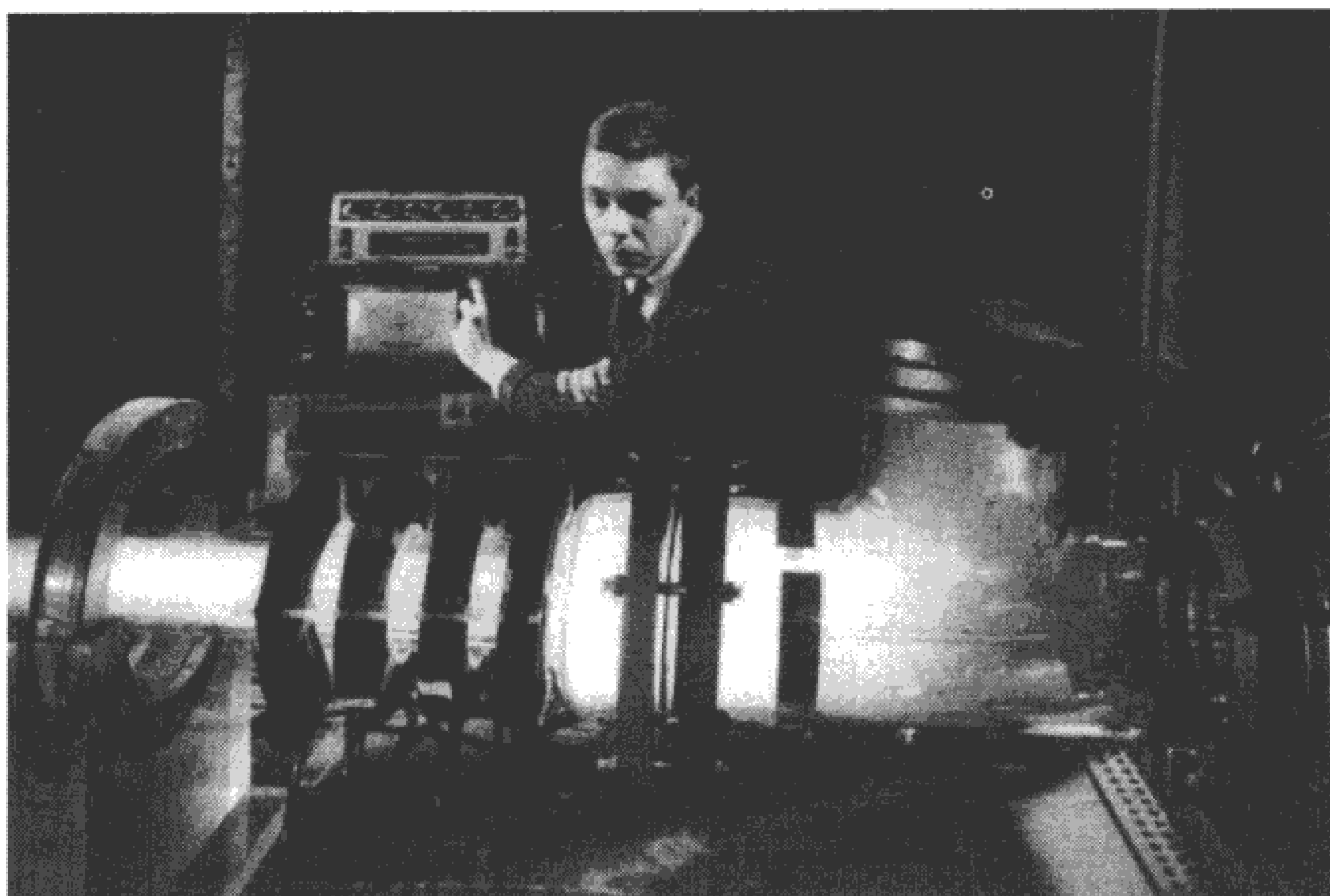
为了从核聚变中获取建设性的而不是破坏性的能量,我们需要一个受控的过程。这里就存在一个问题。核聚变释放的热能很大,有把燃料驱散开来的趋势。想象一下一堆点燃的木柴,火总是分散开,使得不幸而寒冷的露营者不得不一个晚上不停地翻动它们。太阳的巨大质量产生的引力使氢聚集在一起,但在地球表面,人们必须想出其他办法。

一种可能的方法叫做惯性约束,这种方法使用微小的固体小球,小球里含有要发生聚变的氢同位素。高温的产生是由直接照射小球的激光束来实现的。激光很快使小球表面升温,使得表面物质挤压并压缩内部物质。在这个过程中,小球中心达到聚变所需的温度。

另一种方法是使用磁场来约束燃料。聚变所需的高温足以打破一切化学键,甚至使电子脱离它们的原子轨道,这种温度下的物质处于一种特殊的状态,叫做等离子体——一种离子化的气体。由于离子带电荷,所以等离子体会对电磁力起反应。如果气体中打转的离子试图逃离出去,它们就会进入到一个设计好了的磁场,磁场会给它们施加一个回复力让之无法逃脱。这样的一种磁约束装置叫做托卡马克,其形状就像一个圈饼。“托卡马克”一词来源于俄语,在这里意指圈饼形状的真空室和磁线圈。

尽管上面这些方法能让核聚变发生,但还有一个问题需要考虑,那就是如何经济有效地利用核聚变来产生电能。人们使用聚变反应堆来发电的一个重要前提是这些反应堆必须是有效益的。至少来说,它们生产的能量应该比它们消耗的多。很不幸的是,现状并非如此,因为核聚变所需的极端条件相当昂贵。再造太阳内部需要付出很大的花费,而且今天的受控核聚变装置也还不是那么理想。所以,这并不是一个如何使聚变发生的问题,而是一个经济的问题。物理学家甚至早在 20 世纪 30 年代就实现了核聚变,距今已是很长一段时间,但一直都是小规模的,而且需要大量的能量输入。按照目前的理解,大规模的受控核聚变需要类似星体内部的热能和压力才可能实现。

假如没有这些高昂的价格,从核聚变中获取能量应该是很容易的。有没有可能存在某些过程,使得核聚变能在地球上的一般条件下发生呢?人们一直在积极地寻找这样的所谓“冷聚变”的过程。当两位科学家斯坦利 · 庞斯(Stanley Pons)和马丁 · 弗莱



等离子体中的离子被电磁力加速后能以极快的速度运动。通过这种方式，等离子体可以用来给火箭提供推动。(NASA)

希曼(Martin Fleischmann)在1989年宣称他们找到了这样的一种过程时，着实让人们兴奋了好一阵子。他们的设备很简单，只需在室温下把电极(传导电荷的导体)连接到电池上，然后浸到重水中(氢原子核是氘)。他们声称测量到了能量的产生，而且认为能量并不是来自化学反应，而是源于核聚变。

这个消息在科学期刊和报纸上都有大量的报道。如果真是那样的话，能量将会变得便宜而充足。这个发现引起了其他科学家的大量关注，他们中的许多人重复了这个实验，但却得到各不相同的结果或者不同的解释。庞斯和弗莱希曼的结果从此变得极具争议，许多科学家都不相信这样的实验展示了核聚变过程。

理论家们尤其对此表示怀疑。物理学家花了大量的时间来研究原子核，而且由于卢瑟福、居里夫妇、爱因斯坦、费米和许多其他人的杰出工作，已经基本上达成了实验性的和理论性的理解。冷聚变似乎是不可能的。

然而，当我们停下来仔细想一想，很多已经实现了的，在当初看起来都似乎不太可能的——灾难性的炸弹、能够窥视人体内部的医疗设备、生产出很大一部分世界电能的裂变反应堆——所有这一切都来自由强力捆绑起来的质子和中子组成的小小的原子核。检验任何受控核聚变装置的最终标准是它能否经济有效地产生电能，而不管这个装置是热的还是冷的。也许，有关原子核的惊人发现还远远没有结束。

2 量子力学

像许多其他地方一样，宾夕法尼亚州彩票中心通过抽取在容器中随机滚动的标有数字的小球来决定一项日常赌博游戏的赢家。累积赌金随着游戏玩家买票而不断增加，每天下午的 6 点 59 分，会抽取出中奖号码。随机抽取确保了游戏的公平性，因为每个玩家都有相同的机会赢取一部分钱。

随机抽取意味着结果是不可预测的。物理学是有关力和运动的学问，也许有人会认为娴熟的物理学家通过研究小球的运动路线可以计算出中奖号码。小球的巨大数目使这项工作变得困难，而且容器是那么小，安放在一张小桌子上，小球的运动是由旋转或空气喷射等一些简单的原因引起的。任何一个小球的运动路线都是很复杂的，因为它要不停地和容器壁与其他小球发生碰撞，但有关它怎么运动和为什么运动的原理却一点也不复杂。

法国科学家皮埃尔-西蒙·拉普拉斯(Pierre-Simon de Laplace，1749—1827)相信物理学应该能够预测一切运动。17 世纪后期，牛顿发现了支配质点运动的规律，这些规律具有普遍性，适用于宇宙中的一切质点。拉普拉斯和其他一些科学家认为，既然这些规律支配了所有的运动，一位拥有足够信息的物理学家能够预测出整个宇宙的演化过程。根据这种观点，宇宙就像一个机械钟，物理规律精确地决定并支配着每个粒子、物体和星球的运动。

这种决定论对那些习惯于因果关系的科学家来说合情合理。举例来说，一个物体撞上另一个物体，之后两个物体以可预测的速度和方向运动开来。通过对这一组物体的分析，我们可以预先描绘出每个物体的运动轨迹。然而，尽管这个想法看起来非常合理，它却被证明是错误的。这一章介绍了量子力学的惊人发展，它改变了科学家思考问题的方式。量子力学摒弃了拉普拉斯的时钟式的宇宙，取而代之的是一个充满概

率的宇宙，在这个宇宙里，偶然性的因素随处可见。

微小粒子的力与运动

量子力学起源于19世纪末、20世纪初，那时，物理学家开始研究原子和组成原子

知识窗

波粒二象性

波和粒子具有根本不同的性质。粒子是有界限的，是由质量和能量结合成的一个整体，而波则是一种周期性的运动。一个乒乓球是一个粒子式的物体，而一根吉他弦的来回运动则是一种波。粒子的能量是受限了的，而波的能量则分散在组成波本身的运动当中。

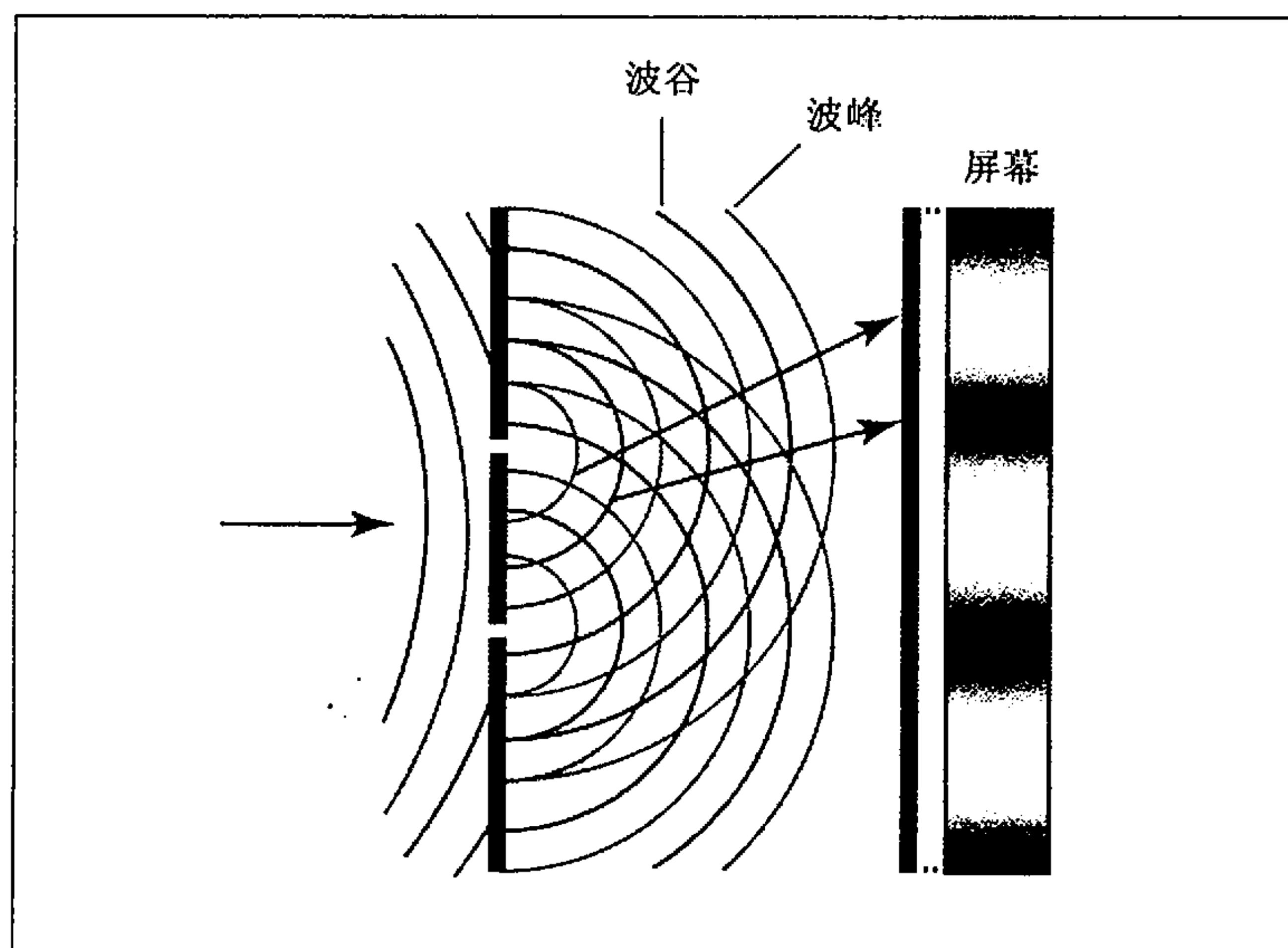
英国物理学家兼医生托马斯·杨(Thomas Young, 1773—1829)通过他的双缝干涉实验显示了光是一种波。如后图所示，当光穿过挡板上的两个狭缝，照亮一个接收屏时，在屏上出现了一系列明暗相间的条纹，而不是两块光斑。如果光是由粒子组成的，那么出现的就应该是两块光斑——粒子穿越两个狭缝，照亮接收屏上的两个分离的部分。杨所发现的是，从两个夹缝过来的光分散了并彼此发生干涉，这正是波的行为。在那些一个波的波峰遭遇另一个波的波谷的地方，两个波相互抵消，于是出现了一个暗点，接收屏上的暗条纹就是这样形成的。光不可能是粒子，因为粒子不可能结合在一起产生零照度。科学家把杨的实验当作是电磁辐射是一种电磁波的证据。

爱因斯坦却愿意去考虑另一种可能性。爱因斯坦用光子的概念来解释光电效应，即金属在光照射的情况下发射电子的现象。金属在发射电子时，似乎并没有吸收波的能量，这使光电效应难以得到解释。用一束明亮的低频率的光照射很长一段时间，并不能释放出任何电子，但当所用的光超过一定频率时，金属就开始将电子喷射出来。爱因斯坦分析了这种现象，认为金属吸收的是离散的一份一份的光(即光子)，而光的能量取决于它的频率——频率越高，能量越大。爱因斯坦正确地指出，当一个具有足够能量来释放电子的光子撞击金属时，光电效应就会发生。

爱因斯坦的光子论将物理学家置于一种两难境地。光到底是波还是粒子？光不可能两者都是，然而这却正是它显现出来的样子，即便光子似乎也有“频率”这个

的粒子。第 1 章提到过，汤姆生在 1896 年发现了电子，卢瑟福在 1911 年发现了原子的原子核。物理学家们认识到，强核力把带正电的质子束缚在原子核中，但对于电子的理解还相当肤浅。人们描绘出一幅轻质量、带负电的电子围绕重的、带正电的原子核运动的简单图像，但从一开始，大家就很清楚，这幅图像并不能解释一切现象。

绕核运转的电子应该不停地向外辐射能量才对，但事实上它们却没有，而且也不



穿过两个夹缝的光波展开并照射到接收屏上。因为光波运行的距离不同，当它们到达屏幕上的某一点时，可能是完全反相的——一个波的波峰可能会遭遇另一个波的波谷。在这种情况下，两个光波相互抵消，产生出暗条纹。

波的属性。当采用一次只能通过一个光子的弱光源来做杨的双缝实验时，接收屏上出现的光点表明了光子的存在，但随着时间推移，屏幕上又逐渐出现了明暗相间的模式，似乎光子和它们自己发生了干涉！

一些科学家已经接受了"波粒"的观念，所谓"波粒"是波和粒子的混合，但它的性质却不明朗也不太容易想象。玻尔认为既然波和粒子的性质都存在，那么对于一个完整的描述来说，这两者都是必要的，由此他提出了互补性的概念。波和粒子是互补的，两者都是谜底必要的一部分。

能，这是一个很大的问题。当被加速时，像电子这样的带电粒子会发出电磁辐射。加速指的是运动的启动、停止或者任何其他变化，包括转动；绕核运转的电子时时刻刻都在经历加速过程，所以它们应该不停地向外发出辐射。辐射是一种能量，这种能量应该来源于某个地方。唯一可知的来源就是物体运动或位置的能量。因此，一个辐射电磁波的电子应该会逐渐慢下来，这样，电子的负电荷和原子核的正电荷之间的吸引力就会把电子拽向原子中心。结果，这个电子就螺旋式地吸附到了原子核上。所以，根据物理学(像当时物理学家所理解的那样)，有关原子核的简单图像似乎是不可能事件，由绕核运转的电子组成的稳定的、持久的原子不可能存在。

丹麦物理学家尼尔斯·玻尔(Niels Bohr，1885—1962)看到当时的物理学理论不起作用了，于是决定提出一套新的理论。1913 年，玻尔提出了最简单的原子氢原子的模型，在这个模型里，唯一的那个电子只能在某些特定的轨道上运行。在玻尔的理论里，电子只在从一个轨道变化到另一个轨道时才发出辐射。这个理论没有任何基础，但它却是有效的。玻尔的理论在描述氢原子的性质方面非常成功，其中包括氢原子的电磁发射光谱——原子辐射电磁波的特定频率。玻尔因为这项贡献获得了 1922 年的诺贝尔物理学奖。

在此之前，德国物理学家马克斯·普朗克(Max Planck，1858—1947)在研究加热的物体发出的电磁辐射时，得出了与玻尔类似的结论。普朗克试图理解这种热辐射的频谱，然而实验测量的结果在低频段却与当时流行的理论——维恩的指数定律不相符合。普朗克没有其他办法可以解释这个辐射频谱，而只能假定辐射是离散的一份一份的。在此之前，物理学家一直相信能量是一个连续的数量，就像一根实数轴一样，任何一个点上都有数值。普朗克却发现能量更像整数，是一系列按单位增加的离散的数值。在玻尔提出他的氢原子的理论之后，人们清晰地看到，电子运行轨道的变化正好对应于普朗克发现的一份份的电磁辐射，由此，一份或一个单位的能量就成了人们所知的一个量子(在拉丁语中是“多少”的意思)。普朗克因为提出了量子化的能量的概念而荣获 1918 年的诺贝尔物理学奖。

与此同一时期的 1905 年，爱因斯坦提出光和其他类型的电磁辐射都是由一种叫做光子的粒子组成的，这一想法引起了一阵轰动。光子的概念和普朗克提出的离散的能量单元契合得很好；一个粒子就是一个离散的、独立的实体，而且携带一定量的能量。如果能量真是量子化的，那么光子的存在就是合情合理的了。但正如知识窗中内容所述，这就带来了一个很大的问题。光已经被熟知为一种波，是一种与粒子完全不同的事物。

玻尔的原子、普朗克的量子和爱因斯坦的光子概念迫使科学家们去接受小量物质

和能量的离散性质。这是一场被称为量子力学的革命的开始。但大尺寸的物体似乎并没有受到影响。和电子不一样,星球似乎并不被限定在特定的离散的轨道上,相反,星球可以在任何轨道上出现。汽车、足球和飞盘似乎也不受能量的离散性质的限制,它们可以以任何速度运行。这些看起来似乎是对的,原因是能量的基本单位非常之小,它们只能在原子和原子辐射的电磁波这个层面上被觉察到。根据理论,星球和汽车的能量也是离散的一份一份的,但因为单位太小,所以在这些大尺寸的物体上测量不到。加到海洋中的一滴水将海平面抬高了一个很小的离散的数量,但即便是太平洋上最细心的岛上居民也无法觉察得到。

量子力学的一个奇怪但却重要的产物就是电磁辐射的波粒二象性。然而,1923年法国物理学家路易斯·德布罗意(Louis de Broglie, 1892—1987)认识到波粒二象性并不仅仅适用于光,在此之后,量子力学变得更为古怪。不仅电磁"波"具有波和粒子的性质,就连粒子也具有这两重性质。

电子显微镜

波和粒子彼此分享对方的属性,这个观念有着令人满意而又让人迷惑的对称性。根据德布罗意的理论,一个粒子的波长 λ 和它的动量 p 有关,其关系如以下等式:

$$\lambda = h/p$$

等式中的 h 是一个被称作普朗克常数的数值。动量通常指的是物体质量和运动速度的乘积,但在德布罗意方程中,p 更为复杂,因为它把爱因斯坦的相对论考虑在内了,相对论将在后面的章节中介绍。

没有谁能够"看见"粒子的波长,但德布罗意是正确的。像电子这样的粒子显示出波的性质,例如杨的双缝实验中的干涉现象,这在知识窗"波粒二象性"中讨论过。像足球、汽车和星球这样的大质量物体由于其动量 p 很大,所以具有非常小的觉察不到的波长。但像电子这样的微小粒子的波长 λ 在干涉实验中可以观察到。德布罗意荣获了1929年的诺贝尔物理学奖。

短短几年之后,科学家就开始运用这个奇怪但却真实的观念来更加深入地窥探微观世界。生物学家很早就开始使用光学显微镜来研究细胞和细菌,这种显微镜采用光学镜头来放大来自细小物体的光线,但光学显微镜能够提供的分辨率非常有限。分辨率指的是分辨物体的能力;在显微镜下分辨一个物体就是指能够看见这个物体并把它同邻近的物体分离开来。因为光线在穿过显微镜的光学系统时会发生分散,所以这些

仪器的分辨率最高只有 0.000 008 英寸(200 毫微米)。这种限制是光的物理性质及其波长所固有的,与设备无关。任何光学显微镜都无法突破这种限制。

电子显微镜在分辨率上可以有很大的改善,因为电子的波的属性与光不同。电子有小得多的"波长",它们的偏向或者分散程度没有光那么大,电子更小的波长使得那些在光学显微镜下很模糊的物体的细节能够显现出来。1931 年,恩斯特·鲁斯卡(Ernst Ruska)与马克斯·克诺尔(Max Knoll)在德国柏林建造了第一台电子显微镜。由于具有更小的波长,电子显微镜的分辨率可以达到 0.000 000 004 英寸(0.1 毫微米),是光学显微镜的数千倍。

电子显微镜有好几种类型。透射式电子显微镜通过发射电子束穿透样品而成像。正因为如此,样品必须非常薄,典型的是 0.000 000 4 英寸(10 毫微米)的切片,样品一般都经过干燥或者化学药剂的处理。因为连空气分子都足以让微小的电子发生偏转,所以显微镜的镜筒必须是真空的,否则电子束就会发生散射。因为同样的原因,光学镜头就不能用了,所以电子显微镜使用磁场来聚焦电子束。由于对切片厚度的要求和镜筒真空的条件,活的样品不能用这种电子显微镜来成像,然而电子显微镜近乎百万倍的放大率提供了样品的丰富的细节信息。

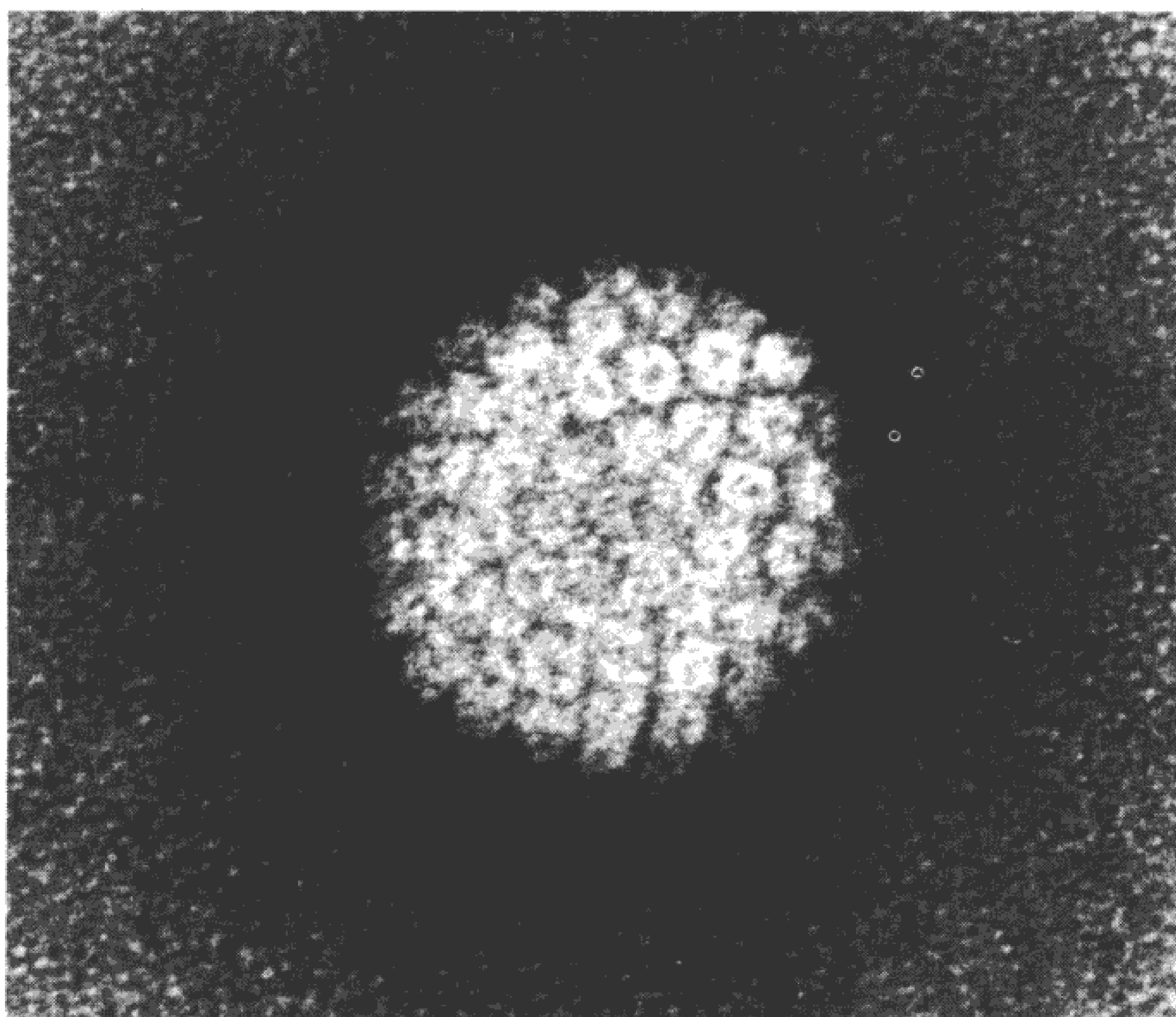
扫描式电子显微镜将电子束聚焦在样品的一小块区域并使电子束在样品表面移动。样品表面散射电子束,经探测器收集后生成地图,产生三维的立体图像。尽管样品还是要密封在真空中,但却不需要很薄的切片,所以任何能够短时间离开空气而存活的生物都可以用来扫描成像(昆虫可以用来成像,但必须胶在一个位置,以免它们爬走)。

电子显微镜所需的设备比光学显微镜精细得多,所以也昂贵得多,但电子显微镜让科学家看到了很多以前不曾看到过的东西。电子显微镜的一个早期的重要应用就是对病毒这种最小的生物的研究。尽管对于病毒是否真的有生命这个问题还存在一些争论,但病毒对其他生物的影响是不可否认的。病毒由蛋白质外壳和包裹在其中的核酸组成,核酸即脱氧核糖核酸(DNA)或核糖核酸(RNA)。病毒平常并不表现出多少活动性,直到它们感染生物细胞并接管那些在反应催化和基因复制中起作用的生化分子时才表现活跃。病毒的核酸中含有少量的基因,这些基因被复制,产生出更多的病毒继续去感染其他细胞。病毒是许多致命的人类疾病的罪魁祸首,这些疾病包括天花以及更近的艾滋病、埃博拉热,还有流感、伤风等。病毒"virus"一词来源于拉丁语,是"毒药"的意思。

19 世纪末期,世界上发现了第一种病毒,这种病毒感染了烟草植株。在当时,烟草对许多农民来说是一种很重要的作物。荷兰植物学家马提那斯·贝杰林克(Martinus Beijerinck, 1851—1931)从患病的植株上取来样品,小心地使用过滤器,试图捕获

导致疾病的元凶。如果病因是细菌的话，实验就应该成功了，然而引发疾病的微生物很小，它竟从过滤器中逃脱了。

大部分病毒的直径都在 0.000 004 英寸（100 毫微米）左右，这个尺寸在光学显微镜的分辨率之下。在电子显微镜出现之前，对这些微小的感染性生物的研究并没有取得多少进展。电子显微镜的出现极大地延伸了生物学家的视野，让他们得以看见甚至是最小的病毒。例如，1939 年，棒状烟草病毒最终在电子显微镜的影像中原形毕露。在 20 世纪的大部分时间里，科学家使用电子显微镜来确定和研究导致某种特定疾病的病毒，例如流行性感冒、脊髓灰质炎和许多其他疾病。引发疾病的病毒一旦被确定，就可以开发出诊断性测试来发现感染者，还可以生产出疫苗来防止疾病的进一步扩散。分子生物学和生物化学方面的进展，例如检测和复制病毒 DNA 的技术，现在为我们提供了很多重要的工具。然而，电子显微镜仍然在与病毒的斗争和对细胞微观结构的研究中发挥着不可替代的作用。



这是采自电子显微镜的一幅人类乳突淋瘤病毒的影像，这种病毒导致疣的产生。（NCI）

知识的限度

电子的微小波长让科学家得以研究和理解病毒,但粒子有波长这个观念仍然令他们感到迷惑,哪怕是像电子这么小的粒子。物理学家最终达成了对量子力学的理解,但与其说是理解,不如说是承认,这个理论的很多部分始终很难或者说是不可能被理解的。量子力学在某种意义上给我们设置了一道屏障——我们能够得到的有关任何粒子或粒子系统的信息总是有限的。

拉普拉斯的确定性的宇宙就没有这些限制。对拉普拉斯来说,物理学家所需要知道的就是系统的初始状态——每个粒子的位置和它的初始速度,如果有的话。知道这个以后,运用牛顿定律,就可以推算出系统未来的演化过程,这个推算可以达到任何想要的精度。不存在不确定性,也不存在不可以计算出来的运动,不管是宇宙中哪个地方的哪个粒子的运动。

然而,量子力学取代了这种观点。由牛顿和其他一些早期物理学家发现的物理规律仍然在很多特定情形下起作用,这些规律有时被叫做经典物理学,但它们并不总是正确的,在原子领域尤其如此。一位现代天文学家可能会采用经典物理学的方程来计算行星的轨道,但一位设计分子级的电子设备的工程师却必须运用量子力学,否则设备就不能正常工作。就拉普拉斯的观点而言,量子力学的方程在性质上与经典物理学的方程有着关键性的区别。牛顿的规律是确定性的——它们所描述的行为是严格确定了的,物体或物体系统没有其他可选的路径。给定一个物体所受的作用力,它就只能在由物理规律决定了的唯一轨道上运动。但在量子力学中,规律是随机性质的,是基于概率的。

20 世纪初期开始研究原子和微小粒子的物理学家并没想去寻找随机性质的规律,因为那个时候,他们和拉普拉斯一样,相信确定性的物理规律支配了大大小小的一切粒子,包括行星、沙粒甚至微小的电子。伟大的奥地利物理学家欧文·薛定谔(Erwin Schroedinger, 1887—1961)在 20 世纪 20 年代提出了一个方程(现在被称为薛定谔方程),这个方程在描述小到原子和电子这样的粒子时相当出色。德国物理学家马克斯·玻恩(Max Born, 1882—1970)和维尔纳·海森堡(Werner Heisenberg, 1901—1976)则在数学矩阵的基础上提出了另一种方法。这两种方法都使用了抽象的数学思维,所以很难理解。令物理学家沮丧的是,数学抽象的结果并没有为粒子或系统的运动预测一个唯一的轨道,而仅仅是指明了一个概率。

在量子力学中，给定一系列条件，一个粒子有许多可能的轨道可以选择。量子力学中的方程并不能确定出唯一的轨道，而只能给每条可能的轨道分配概率，至于粒子实际上走的是哪条轨道，只有到事件发生时才能确知。量子力学可能会这样描述：粒子有 60%的可能性会走路径 A，25%的可能性走路径 B，15%的可能性走路径 C。这就是方程所能提供的全部信息。这些信息的含义是，如果一个物理学家做了 100 次完全相同的实验，那么粒子大约有 60 次会走路径 A，大约 25 次走路径 B，大约 15 次走路径 C。至于在具体的某次实验中，粒子将走哪条路径，量子力学就显得无能为力了。

这和牛顿以及拉普拉斯的确定性的物理学有很大不同。在经典物理学中很少有需要用到概率的时候，因为一旦知道了作用于粒子或系统上的所有力，通过方程就能得到精确的轨道。概率只有在并不是所有的力都知道或者系统太复杂以至于方程难以求解的情况下才用得上。

因为量子力学只能提供概率而不能提供确定性的信息，物理学家就在想，是否有另外的信息或者理论能够为我们提供一个对自然的完善而令人满意的描述。杨的双缝实验中的干涉模式是一个很好的例子。用波来解释这种干涉模式是很容易的，但前面提到过，对于微弱的光源来说，干涉模式是逐渐建立起来的，一次一个斑点——一个粒子。在逻辑上，每个粒子只能穿过两个夹缝中的一个或者另一个，量子力学用概率来描述这两种可能的选择。但经典的确定性的物理学却试图指明每一个粒子到底穿过的是哪一个夹缝。

然而，经典物理学失败了。不管是光子还是电子还是其他什么粒子，粒子都是完全相同的，而且在它们穿过夹缝时所受的作用力也是完全相同的。在这样的情况下，它们应该走相同的路线才对，但实际上并不是这样。一些粒子穿过其中一个夹缝，另一些粒子穿过另一个夹缝，物理学家找不到任何办法来事先确定某个粒子将穿过哪个夹缝。预测再也没有比量子力学所提供的概率更好的了，而且，除非有人在看着，否则这些粒子似乎同时穿过了两个夹缝，就像一列波一样！

1927 年，海森堡将这些观察总结成一个现在被叫做“测不准原理”的观点。海森堡认为，我们所能获得的知识是有限度的，这并不是由于缺少信息，而是由于物理本身的特性。设想一下确定一个粒子的位置和速度的过程。要作出测量，物理学家必须使用某种仪器，利用从粒子反射的光线。毕竟，一个粒子要能被看见才能被测量，而被看见就需要光线的反射。这种干扰并不会对一辆汽车或一个足球产生什么影响，但却会影响一个电子，因为吸收这种能量足以扰乱这个微小粒子的运动。海森堡相信，我们永远不可能作出准确的测量，因为测量行为本身带来了不可预测的变化，而这种变化

只能通过另一个测量来确定。然而，这个测量又会带来进一步的变化。知识是有限的，因为测量是有限的。

海森堡所表明的是，概率是物理学家所能及的最好的描述。“测不准原理”论证了为什么像位置和速度这样的变量不能同时被确切地得知。如果我们精确地知道了一个电子的位置，那么它的速度就一定是不清楚的，因为对位置的精确测量导致了速度的变化，反过来也一样。这就意味着，要像拉普拉斯所设想的那样去对宇宙作出完备的预测，将永远是我们所不能及的。物理学家在作出准确预测之前必须知道系统的初始状态，这在海森堡看来是不可能的。

海森堡、玻恩和玻尔试图抛弃决定论，但 20 世纪初期的其他一些杰出物理学家却不甘心这么轻易地放弃。让薛定谔等物理学家不快的是，量子力学似乎忽视了逻辑。薛定谔坚持认为，杨的双缝实验中的光子或电子事实上确实只通过了两个夹缝中的一个或另一个，量子力学没有办法预测出粒子到底将穿过哪一个夹缝，这只能说明这种理论是不完善的。

根据玻尔对量子力学的解释，除非有人在看，否则光子或电子确实同时穿过了两个夹缝，正是测量行为决定了这些事物是表现出波的还是表现出粒子的特点。薛定谔描述了一种实验条件，用以揭示这种解释的逻辑问题。他设想了这样一个实验：一只猫被关在一个放有一瓶致命毒药的箱子里。这是一个“思维实验”，并不会实际去做。薛定谔的目的是启发人们思考。瓶子随时可能破裂，这是由如粒子的轨道这样的随机事件来触发的，在量子力学里，这个轨道在测量之前是不确定的。没有人能够看到或听到箱子里的任何动静，所以没有人知道瓶子是否已经破裂并把猫毒死了。按照玻尔对量子力学的解释，只有看的动作能够决定粒子走了哪条路径以及系统处于何种状态，那么，在有人打开箱子之前，猫就应该被认为既是活的又是死的！

薛定谔的观点是，不存在所谓的不确定状态。那只猫要么是活的，要么是死的，不管是否有人看。然而，薛定谔的论证并不像他所希望的那么有效。他的论点不仅没有造成对量子力学的实质性质疑，相反却强调了一种新型的令人惊讶的计算机的可能的基础。

量子计算机

物理学家认识到他们对量子力学的解释看起来是多么奇怪。大家都承认这样一个事实：与经典物理学不同，量子力学正确描述了微小粒子的运动和行为特点。唯一

的分歧就在于，量子力学的随机性质到底是不是物理学的本来面貌，或者是不是有一种更完善的理论在等待被发现。

玻尔很清楚，在平常的日常生活中，经典物理学的决定论显得更为合情合理。像汽车加速这样的事件往往都是有原因的（在这里是发动机提供的作用力），没有人会说测量使得这辆汽车可以是一列波或者是一个粒子。大的物体都遵守牛顿的运动规律、经典物理学和决定论。在玻尔对量子力学的解释背后的思想是，在任何情形下都存在一些不确定性，但是只有当涉及如电子这样的微小粒子时，这些不确定性才变得显著起来。一辆汽车也是有波长的（见第 46 页的方程），但即使是最灵敏的仪器也无法检测到这一波长，而且它并不影响汽车的运动。这样看来，经典物理学实际上是一种近似的理论，对于大的物体来说，这个理论非常有用，但它却很难甚至根本不适用于微小的物体。

当今大多数物理学家都接受玻尔对量子力学的解释或者其他一些类似的观点。用量子力学来描述微小粒子的行为，其准确性是相当出色的。举例来说，建立在量子力学基础上的量子电动力学，其精确度如此之高，以至于它作出的某些预测与实验结果的一致性精确到了几十亿分之一。这就好比测量美国从东海岸到西海岸的距离，而误差不超过一根头发的直径那么大。尽管一些科学家不太喜欢量子力学所暗示的宇宙的随机性，但对这一理论的有效性和精确性，无可辩驳。

同样地，不确定状态的思想可能也仅仅适用于那些微小的物体或粒子。尽管薛定谔曾经用猫的实验来对这一思想进行批驳，有些人开始考虑这一思想是不是可以在更大的宏观世界中派上用场，就像电子的波长可以决定电子显微镜的分辨率那样。或许，不确定状态的存在也会有它的用武之地。

20 世纪 70 年代，美国物理学家理查德·费曼（Richard Feynman，1918—1988），曾经预想出一种利用不确定状态来加工信息的威力强大的计算机。他和朝永振一郎（Sin-Itiro Tomonaga）以及朱利安·施温格（Julian Schwinger）因为在量子电动力学方面的杰出工作，一同分享了 1965 年的诺贝尔物理学奖。现在的计算机处理的是二进制数据，这些数据是由 1 或 0 组成的长长的数字串。1 和 0 被叫做比特，它们代表了一些逻辑状态，易于被计算机储存和加工。将来，基于量子力学的新型计算机（量子计算机）处理的可能也是二进制数据，但那时的逻辑状态就可以是 1 或者是 0 或者是它们两者的某种结合。

量子力学所描述的不确定状态使量子计算机具备了比“经典”计算机大得多的灵活性。量子计算机的基本信息单元叫做量子位，它是二进制的 1 和 0 的混合物。这种

计算机的优点是它拥有更多的工作状态,而且可以平行加工信息——同时加工很多信息,而不是系列加工,一次只处理一个单位的信息。设想一台普通计算机处理4比特的数据,比如1010。如果每一位都必须是1或者0,那么一共可以组成16个互不相同的4位的数字。但如果每一位并不一定要是1或者0而可以是它们的某种组合,那么可以组成的互不相同的数字的数目就成千上万了。如此之多的工作状态使量子计算机具备了有如一台能同时操作上百万比特的计算机那样强大的威力。在同样的4个比特的空间里,量子计算机不再局限于4位数字的16种状态,而是拥有了众多的选择。

利用不确定状态来工作的计算机其威力是非常强大的,它们可以轻易地破解当今的安全加密系统。如何对一个很大的数字进行因式分解这一数学问题,是许多加密术的基础。举例来说,安全网页所用的128位加密使用128位的数字。这样的数字有多大?它相当于1后面跟上40个零。但对于量子计算机强大的并行处理能力来说,别说128位,就是比这高得多的位数,破解它也是轻而易举。

目前尚不存在完全意义上的可操作的量子计算机。一个很大的障碍就是,不确定状态一经测量便不复存在了。如果有人在观察,那么电子就只能穿过两个夹缝中的一个或另一个,薛定谔的猫就要么是活的,要么是死的。量子计算机的设计者必须考虑如何对数据进行读写,而这些操作又会怎样影响信息加工。在量子理论中,"看"这一行为本身就足以改变整个系统——这正是海森堡的测不准原理的基础——所以,量子计算机操作起来是相当困难的。

然而,这一技术一直在取得进展。2000年,位于加利福尼亚州圣何塞的IBM阿尔马登研究中心的科学家们设计出一台5个量子位的计算机,这台计算机由5个氟原子核组成。"编程"是通过向系统输入电磁脉冲来实现的,这台计算机可以进行一些简单的计算操作。阿尔马登的研究者们继续在类似的方法上付出努力,例如由被电磁力约束的离子组成的系统,这种约束将离子隔离起来,使得它们的不确定状态能够维持很长一段时间。每个离子对应一个量子位,并利用激光来读写系统中的信息。目前的研究试图确定那些导致不确定状态瓦解的因素,由于状态瓦解,平行计算的有效性受到了很大的限制。

传送"我":量子隐形传送

薛定谔并不是唯一一个难以接受量子理论的奇特性的物理学家。爱因斯坦也许可以说是20世纪最伟大的物理学家,就连他也认为量子力学在某些方面是无法令人

满意的。他和他的两位同事鲍里斯·波多尔斯基(Boris Podolsky)、内森·罗森(Nathan Rosen)一起,提出了一个思维实验,他认为这个实验可以揭示出量子理论的瑕疵。然而,跟薛定谔的思维实验一样,爱因斯坦只不过是进一步强调了量子理论的奇特性,并为实现量子隐形传送提供了一种可能,就像科幻系列影片《星空奇遇》中用"光束"在空间中传送人和物体那样。

爱因斯坦的思维实验涉及一个叫做"纠缠"的概念。在量子力学中,"纠缠"指的是两个或多个粒子的状态紧密地关联在一起,即使它们可能彼此相隔很远。这种情况之所以发生,是因为不确定状态可以包括不止一个粒子,而它们各自的状态和轨道彼此连接在一起。例如,在前面提到的双缝实验中,我们可能已经知道组成一对的两个电子将穿过不同的夹缝。尽管量子力学不能事先预测哪个电子——E1 或者 E2——将会穿过哪个夹缝,但如果有测量表明 E1 穿越的是夹缝 A,那么 E2 穿越的就肯定是夹缝B了。

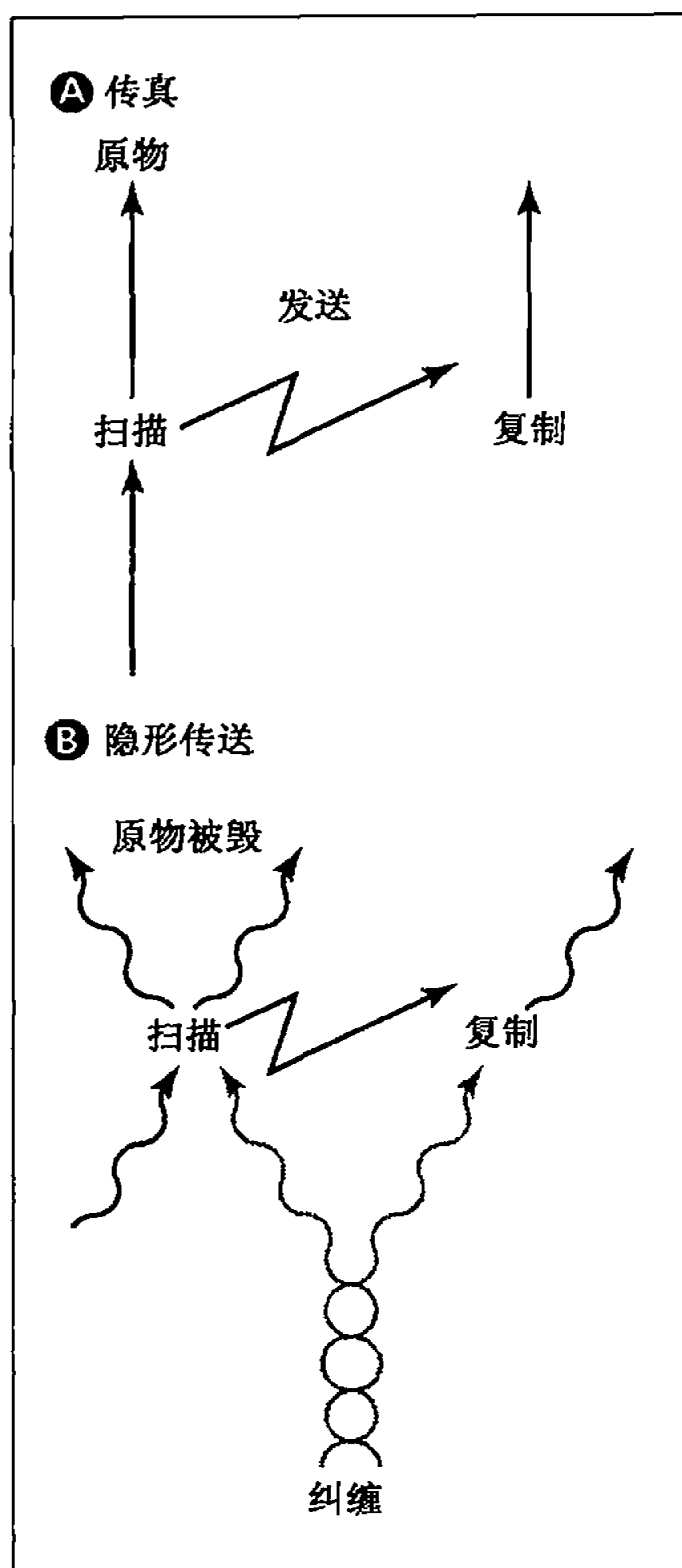
"纠缠"为量子计算机提供了一种将各个成分的逻辑状态关联起来的方法,从而使它们能够协同工作。但令爱因斯坦困惑的是,"纠缠"竟然不受距离的限制,能够穿越任何空间而起作用。即使粒子之间相隔数英里,甚至当它们位于不同的星系,对一个粒子进行测量就自动决定了另一个粒子的状态。设想一个化学反应或核反应,产生出两个相互飞离的电子,反应的特点就是产生两个自旋方向相反的电子——一个向上,一个向下。量子力学只用随机的概念来描述这个反应。两个电子及其状态都是已知的,但具体哪个电子向上自旋、哪个向下自旋却不能事先预测得到。如果有一位物理学家对其中一个电子进行实验并测量到一个向上的自旋,那么由这两个电子所组成的系统的不确定状态就瓦解成一个确定的状态了。这也就是说,另一个电子的自旋状态,起初是不确定的,而现在却被决定了,尽管它可能处在一个遥远的地方。

这让爱因斯坦很困惑,因为他自己的思想和理论认为,没有什么信息能够以超过光速的速度进行传播。本书第 4 章将详细介绍爱因斯坦的理论。然而在这里,科学家却似乎可以通过一次测量就决定一个电子的自旋状态,尽管这个测量可能发生在另一个星球甚至另一个遥远的星系上面。

尽管爱因斯坦有这样的疑惑,类似上面提到的成对电子的实验却证明这种情况确实是会发生的。然而这个结果和爱因斯坦的理论并不冲突,因为在这个现象中并没有信息的传递。对第一个电子的测量决定了第二个电子的状态,但除非有信息从作出测量的人那里以无线电波等常规方式传播过来,第二个电子的观察者是不可能知道有人对第一个粒子进行过测量的。对第二个观察者来说,第二个电子的状态仍然是未知

的,直到对其进行测量或者接收到来自第一个观察者的信息。

即使"纠缠"并不违反任何物理规律,它仍然是由量子力学推出的一种非常奇怪的现象。根据理论,第二个电子的状态在被观察之前是不确定的,如果是这样,那它似乎"知道"在有人对第一个电子进行测量之后自己该选择一种什么样的自旋状态。这就是爱因斯坦的论证的核心,跟薛定谔有关猫的观点非常相似。如果第二个电子的状态是向上和向下自旋的混合,这在被观察之前是不确定的,那么第一个观察者的测量似乎影响了第二个电子的状态。爱因斯坦对此无法理解。



(a)传真机扫描原始文档,通过电话线传送其副本,然后复原成原始文档。(b)隐形传送"扫描"原物,根据海森堡的测不准原理,原物被破坏了,然而"纠缠"将原物的属性和另一个物体联结起来,从而可以在另一个遥远的地方制造出原物的副本。

爱因斯坦之外也没有其他人能够用经典物理学来解释"纠缠"现象。尽管如此,这个过程却是有用的。虽然没有信息的传递,"纠缠"却可以制造出物体的副本并实现穿越空间的传送,这就是被叫做隐形传送的过程。

科幻小说作家早就创造出了隐形传送技术,但在量子力学出现之前,这一技术并没有任何科学基础。想法是这样的:在一个地点对一个物体或人进行扫描,然后在另一个地点制造出一个精确的副本。原来的物或人通常在这个过程中被毁灭了。人或物体并不是真的移动了,实际上所传送的仅仅是它们的结构,这个结构在副本中被实体化,并且难以同原物区分开来。像图中所描绘的那样,隐形传送机与传真机很类似,所不同的就是隐形传送机的扫描过程毁灭了原来的物体。

"纠缠"现象是一种远程相互作用,这种远程作用曾经让爱因斯坦相当困惑。一个包含反应或其他事件的实验提供了相互纠缠的粒子。处在一个地点的观察者通过一系列精确的测量确定了一部分粒子的状态。测量就好比是复制

一个粒子的状态。根据海森堡的测不准原理,测量行为打乱了这个粒子的状态,然而与之“纠缠”的粒子现在却处于相同的状态了。原物被“毁灭”了,但其副本却存在于另一个地点了。

用光子做的实验证实了量子隐形传送是可以发生的。奥地利维也纳大学的科学家们在 2004 年成功地将光子传送过了多瑙河。虽然在之前的实验中光子也被传送过很短的距离,但这一次是第一次在实验室外实现的传送过程。河底的光缆将光子的状态(量子位)传送到了河对岸。

2004 年的另一个重要的实验将传送过程扩展到了原子上。洛斯阿拉莫斯国家实验室的物理学家丹尼尔·詹姆士(Daniel F. James)与奥地利因斯布鲁克大学以瑞纳·布拉特(Rainer Blatt)教授为首的研究团队合作,他们利用钙离子,将量子状态仅仅传送了千分之一英寸,尽管这个距离很短,然而这个实验的意义却是不一般的,因为原子是比光子复杂得多的物体。为了控制条件,研究者们把原子冷却到了极低的温度并使用激光来操纵它们的状态。传送的保真度(复制的精确性)并不总是那么理想,但这个实验确实表明物质和光一样是可以远程传送的。

目前的量子隐形传送的能力离《星空奇遇》里所描述的还有很长一段距离,而且也不可能在不久的将来将人传送到遥远的星球上去。人是高度复杂的原子的集合,而且小于 100%的保真度将酿成一场灾难。但这只是一个工程学的问题。归功于量子力学的出现,已经没有什么物理规律可以妨碍这项技术在将来被开发出来。

物理学迈出的这勇敢的一步使得很多科幻故事忽然间变得非常合理,而且还有可能变成现实。然而,有关量子力学,最重要的也许还是它的局限性。拉普拉斯梦想着一个我们可以知晓一切细节的宇宙,只要拥有足够的信息,任何事件都可以预测。量子力学则揭示了一个完全不同的宇宙,在这个宇宙中概率起了很大的作用。在拉普拉斯的时代,赌博仅仅看起来似乎是随机的——人们相信结果之所以不能预测是因为缺乏足够的信息。然而今天,量子力学指出随机性并不是由于缺乏信息,而是物理性质本身的一部分。不管赌博用的是乒乓球还是电子,在有人进行测量之前,一定程度的不确定性总是存在的。

3
粒子物理学

在1895年之后的几十年里，物理学家认识了很多新事物。本书前两章讲到，这个时代的物理学家研究了放射性，找到了原子的组成成分——电子和原子核，而原子核又由质子和中子组成，并且发现微小粒子的行为和属性并不遵从牛顿的经典物理学，而是服从量子力学的规律。然而，有关这些粒子的性质的有趣问题却一直存在着。电子、质子和中子彼此之间的相互作用力是怎样的，这些粒子是否由更小的粒子所组成……人们想知道得更多。

要找到这些问题的答案并不容易。显微镜在这里一点用都没有，因为这些粒子太小了，根本无法成像。即使是第2章中介绍过的电子显微镜也派不上用场，因为电子显微镜用来成像的电子束本身就是由粒子组成的，而这些粒子和被研究的粒子大小差不多。为了探究电子和质子，物理学家需要更微小的粒子，用它们撞击电子或质子，然后观察这个粒子怎么被反弹或者运动轨迹发生什么变化。这就是科学家使用电子束来研究小物体的方法；类似的方法应该也能提供有关电子和质子的性质及其表面状况的信息。

问题就在于没有谁知道任何这样的更小的粒子。于是，20世纪中期的物理学家决定观察高速的电子或质子相互碰撞或者与其他粒子发生碰撞的情景。碰撞的能量对于研究粒子之间的作用力应该已经足够了，而且如果这些粒子是由更小的粒子所组成的话，碰撞甚至可以将这些粒子拆离开来。观察这个过程的另一种方法是考虑这些粒子的“波长”λ，在第2章中介绍过，当粒子的速度增加时，它们的波长将会变小。高速运动的粒子波长很小，由于其分辨率比较高，所以可以提供更丰富的细节信息。

有关粒子碰撞的实验取得了很大的成功，为我们提供了极其丰富的信息，并产生出很大数量的粒子。物理学家甚至发现了一种叫做反物质的新物质，英国物理学家保罗·迪拉克(Paul A. M. Dirac, 1902—1984)曾经预言了反物质的存在。这些发现是

粒子物理学的重大进展，也是理论和应用进一步向前发展的新起点。

粒子加速器

对高速粒子的需求意味着物理学家要么找到一个高速粒子的天然来源，要么人为地给粒子加速。实际上，早期用来研究电子的仪器中有一些就是粒子加速器，虽然那时候的物理学家并不把它们想成这样。第一章讲过，汤姆生在 1896 年发现了电子，在此之后，很多科学家都使用阴极射线管来研究这种粒子。

阴极射线管主要由一根抽成真空的玻璃管组成。玻璃管里面包含一个叫做阴极的金属电极和一个正电源，比如充有正电的阳极。阴极受热后释放出电子，根据库仑定律，带有异种电荷的粒子相互吸引，所以阳极吸引这些带负电的电子。电子向前加速，碰撞到某种检测装置上，这些装置表面通常覆有磷光性的物质，被电子撞击后可以发出光线。“阴极射线管”这个名字中之所以包含“射线”两字，是因为早期的物理学家认为电子束是一种射线。这种设备，通常简称为 CRT，今天仍然被用作某些电视机和计算机监视器的图像显示屏。

然而，对于粒子碰撞实验来说，却需要有更高的速度。速度越大的粒子具有更多的能量，而更多的能量可以增加碰撞的效果。科学家已经发现了一种天然的高速粒子源，它来自不可预期的地点——太空。

奥地利物理学家维克托·赫斯(Victor Hess, 1883—1964)在 1911 年发现了宇宙射线。许多宇宙射线都能使原子或分子电离，也就是说，射线和一个原子或分子发生碰撞或相互作用，可以使原子或分子发生分裂并产生自由电荷，这种现象我们在第一章介绍过。虽然起初被叫做射线，后来却发现它们其实是来自宇宙空间的高速粒子(这就是科学家将其命名为宇宙射线的原因，cosmic 一词来源于希腊语，意为“秩序”或“宇宙”)。宇宙射线是一个稳定的高速粒子源，其中大部分为质子。尽管天文学家和物理学家对其细节并不确定，但他们相信这些粒子有很多都来自叫做超新星事件的星体爆炸，这在第 5 章将会有介绍。

宇宙射线具有的能量足以分裂原子，这意味着它们有足够的速度，可被用到粒子碰撞实验中来。这些高速粒子在到达地面之前，很多都被地球的大气层阻挡在外或者被减速了，所以对物理学家来说，最好的选择是到山顶上或者利用气球上升到空气稀薄的高度进行实验。通过观察宇宙射线撞击或穿越不同的物质，物理学家发现了一些奇怪的新粒子，例如 μ 介子和正电子。

知识窗

回旋加速器——R约去R

由于磁场可以使沿着磁力线垂直(成直角)方向运动的电荷发生偏转,回旋加速器的磁体将带电粒子诸如电子和质子的轨道弯曲成一个圆。如果粒子的运动完全处在磁场中,因为磁力一路使其发生弯曲,所以粒子的轨迹就形成了一个圆。这个圆的半径 R 等于粒子质量 m 与速度 v 的乘积除以磁场强度 B 和粒子所带的电量 q:

$$R = mv/Bq.$$

粒子的速度等于它运行的路程除以时间。半径为 R 的圆的周长为 $2\pi R$,其中 π ("pi")是一个约等于 3.14159 的常数。对于一个在半径为 R 的圆形轨道上运动的粒子,其速度 v 是 $2\pi R/t$,其中 $2\pi R$ 是圆周的长度,t 是粒子完整运动一周所需的时间。劳伦斯意识到如果用 $2\pi R/t$ 去替换上面计算 R 的方程中的 v,就得到了下面的方程:

$$R = (m/Bq) \cdot (2\pi R/t).$$

两边同时乘以 t

$$tR = (m/Bq) \cdot 2\pi R$$

两边同时除以 R

$$t = (m/Bq) \cdot 2\pi$$

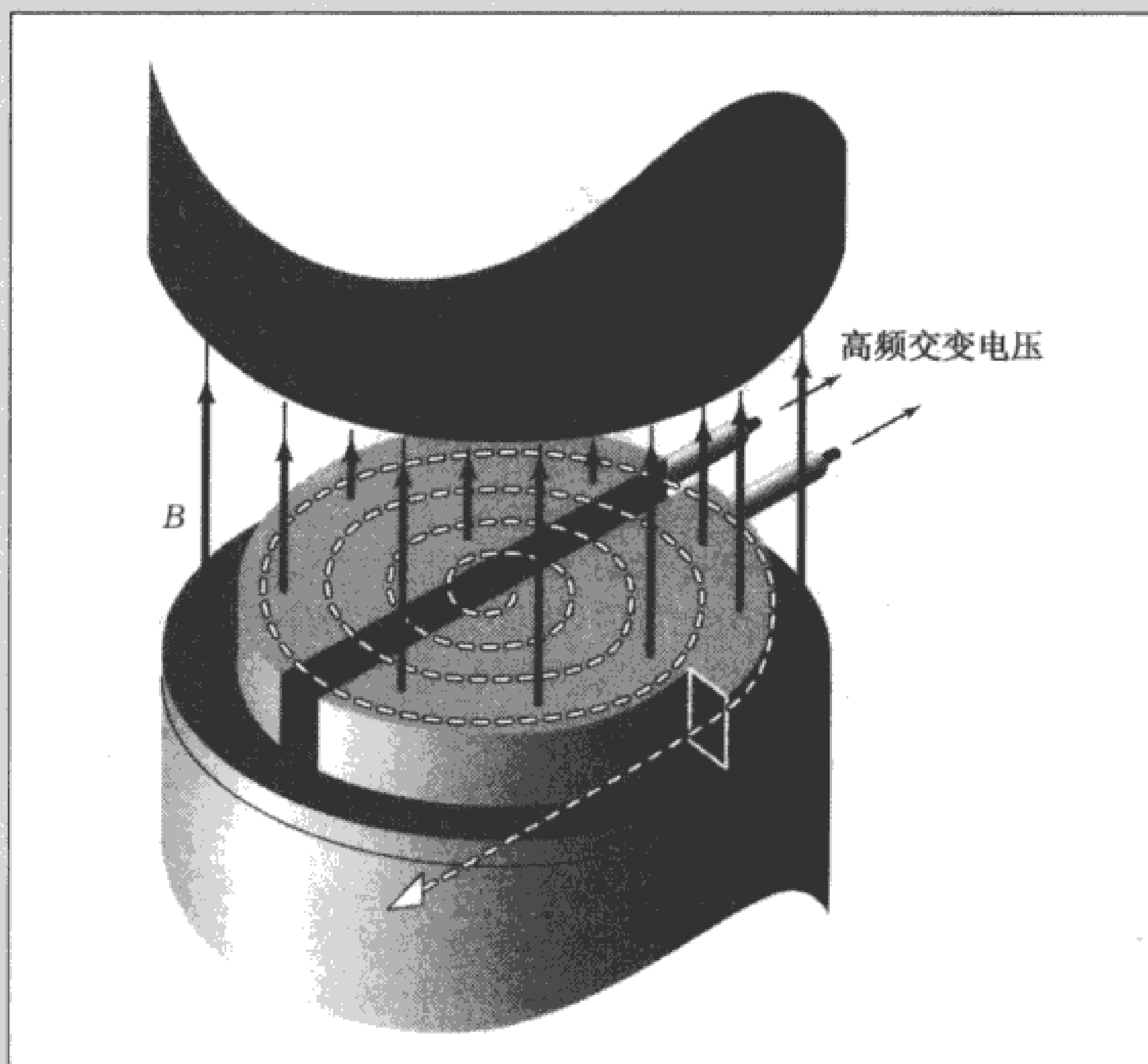
这样就得到了计算粒子运行一周所需时间 t 的方程:

$$t = 2\pi m/Bq.$$

因为"R 约去了 R",据说劳伦斯当时在写出这个方程时如此兴奋地说道,时间并不取决于圆的半径 R。这一点很重要,因为当加速器给粒子提速时,粒子运动的轨道半径越来越大(见上面的计算 R 的方程)。然而,粒子运动一周所需的时间并没有改变,这样一来,加速器就可以在每一周的特定时刻给予粒子一个周期性的推

宇宙射线带来了很多有趣的发现,但物理学家开始有点恼怒了,因为他们竟然要依赖自然为他们提供实验的必要成分,而自然往往是难以预期的。物理学家想要的是这样一种设备,这种设备能够在他们需要的时候随时为他们提供各种速度合适的粒

进。通过这种方法，加速器可以只用一个较小的电压对带电粒子实施一系列加速过程，最终将粒子的速度提高到所需的水平。比起用单一的极高的电压来加速粒子，这种方法要安全得多，也方便得多。下图是回旋加速器的基本组成示意图。

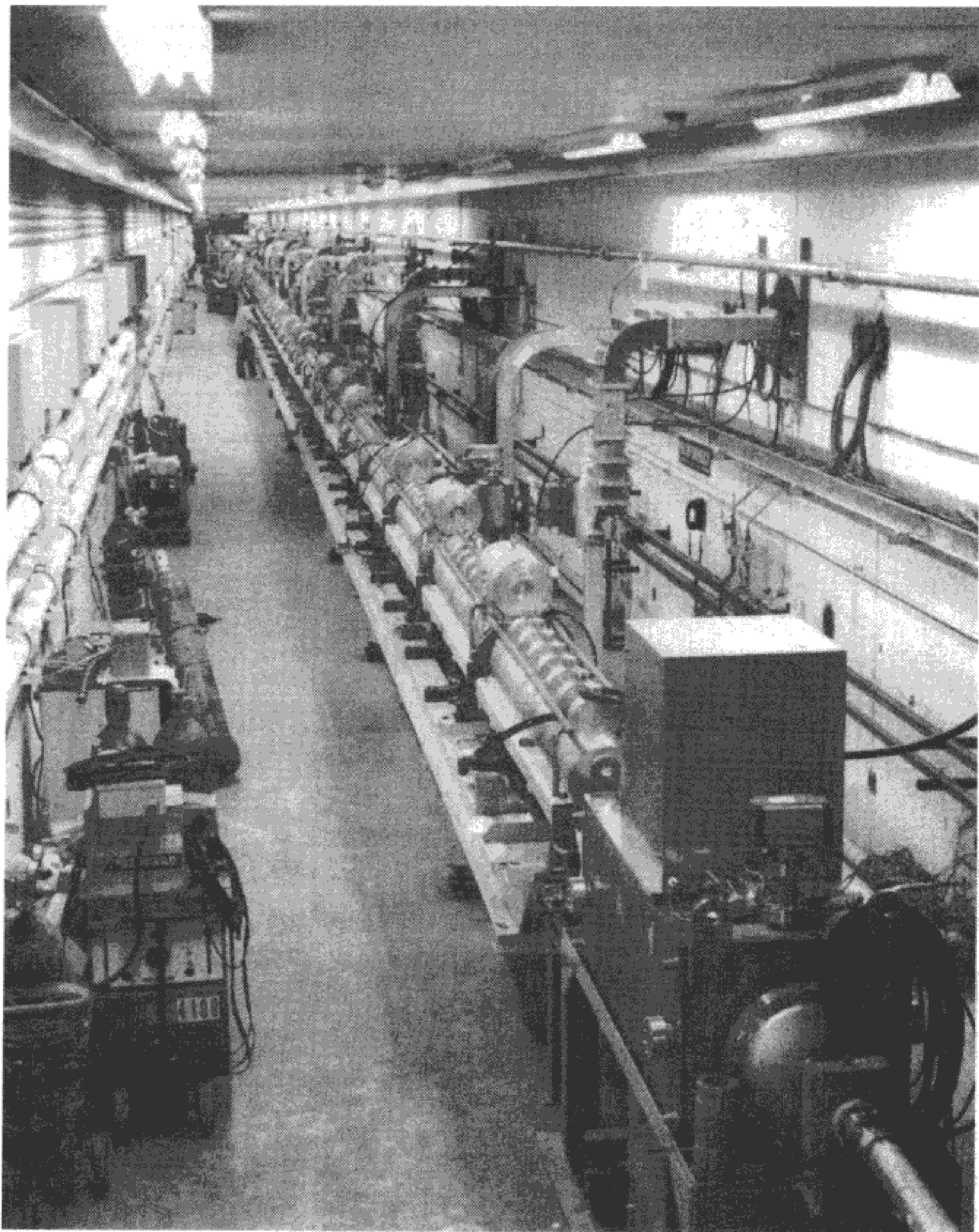


中空的D字形电极提供一个正负交替变化的电压，两个电极的电性总是相反的。与粒子运动平面垂直的磁场B使带电粒子沿着圆形轨道运动。粒子运动于其中的电极提供与粒子电荷符号相同的电压，因为同性相斥，所以这个电极会排斥带电粒子。而另一个符号相反的电极则吸引带电粒子。粒子穿过两个电极间的间隙时，被一个电极推开，而被另一个电极拉过来，于是就被加速了。接着，两个电极交换符号，又开始重复刚才的过程。随着粒子加速的增加，它不断向外螺旋运动。

子。粒子加速器就十分有用，因为它使受控的实验成为可能，而且允许根据需要将实验重复任意多次。和阴极射线管类似，加速器使用更大的电压和距离，使粒子在一条直线上运动，将其加速到很高的速度。但在20世纪中期，出现了另一种加速方法，这

时的加速器可以在圆形或环形轨道上加速粒子。

早期的环形加速器都是在美国物理学家欧内斯特·劳伦斯(Ernest Lawrence,1901—1958)1929年的一项发明的基础上发展起来的。劳伦斯是加利福尼亚大学伯克利分校的一名教授,他建造了一台广为人知的回旋加速器的粒子加速器。知识窗中内容介绍了这种重要的早期加速器。



这台直线粒子加速器位于费米实验室。(费米实验室视觉媒体部)

第 1 章讲到过，一些医院使用回旋加速器或者其他类似的加速器来产生离子束用于疾病治疗。但因为粒子是在一个给定的区域内被加速的，比如第 65 页图中的磁体和电极板，所以加速器只能和这些成分一般大。

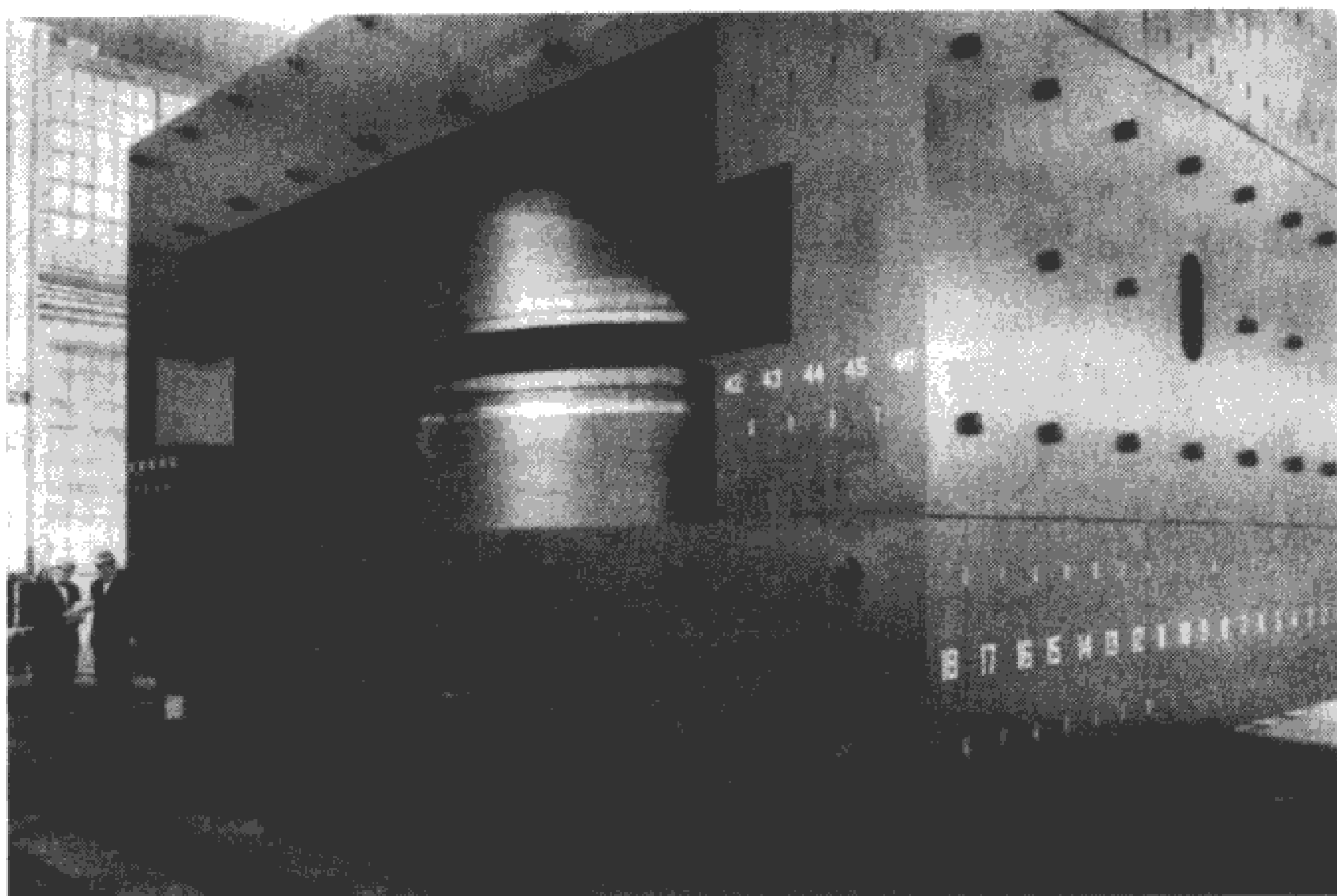
当今最大的粒子加速器有着相似的原理，即通过一系列的步骤来使粒子达到很高的速度，当然这样的加速器可以是直线的也可以是环形的。直线加速器在一条直线路径上运用一系列的加速步骤，并不使粒子的运动轨迹弯曲成环状。巨型直线加速器可以在位于加利福尼亚的斯坦福大学的斯坦福直线加速器中心(SLAC)和其他一些实验室看到，比如在位于伊利诺伊的费米国家加速器实验室(费米实验室)。费米实验室因纪念意大利物理学家恩里科·费米而得名，费米职业生涯的一部分是在伊利诺斯州的芝加哥大学度过的。斯坦福直线加速器中心的直线加速器长达 2 英里(3.2 千米)，是世界上最长的直线加速器。

当今的许多环形加速器都主要由一个回旋加速器组成，回旋加速器将粒子加速到一个中等的速度，此外加速器还包含一个巨大的环，这是进一步加速过程发生的场所。磁体将粒子约束在环内，而快速变化的电磁力使粒子加速。这些环形加速器就是所谓的同步加速器，例如费米实验室的万亿电子伏加速器“Tevatron”，其周长为 4 英里(6.4 千米)。同步加速器中的粒子可以在环中运行很多次，而直线加速器中的粒子则只能一次通过，所以同步加速器要比直线加速器优越。

虽然可以使用大量的加速步骤，对于环形加速器，加速次数甚至可以是实验者想要的任意多次，但困难仍然存在。带电的粒子在加速时要向外发出辐射，而辐射使粒子的能量降低。环形加速器尤其受到辐射的影响，因为它们的环形路径造成了一个持续的加速过程；加速是速率或方向的改变，弯曲的路径时刻改变着方向，结果是产生了稳定的辐射。

粒子加速器的性能也是有限度的，这是由物理规律决定的。粒子永远也不可能被加速到超过光在真空中的速度，这个速度是 18.62 万英里/秒(30 千米/秒)。爱因斯坦第一个提出存在这样一个速度的上限，他的理论将在下一章介绍。有关环形加速器的另一个问题也是爱因斯坦的一个发现——当一个粒子速度增加时，它表现得似乎质量增加了。这样一来，回旋加速器的公式就不再那么简单了，因为时间 t 跟质量有关。这个效应要求修改回旋加速器的概念，于是出现了一种新的机器，即同步回旋加速器。

当今最强大的加速器分布在斯坦福的直线加速器中心、费米实验室以及世界最大的粒子物理学中心，即欧洲原子核研究组织，该中心位于法国和瑞士的交界地带。人们也把这个研究中心叫做 CERN，CERN 是该中心的曾用名的缩写词。CERN 拥有



NASA 兰利研究中心的一台质子加速器所用的磁芯重达 600 万磅(26.7 百万牛)。(NASA)

数台直线和环形加速器,而且目前正在建造将成为世界之最的新的加速器。这台被叫做大型强子碰撞机(LHC)的加速器将占据一个周长达 16.5 英里(26.5 千米)的环形隧道,这里原本是一台刚刚被拆除的加速器的地盘(后面将解释强子和碰撞机这两个名词)。CERN 的科学家们期待大型强子碰撞机能在 2007 年开始工作。

然而,加速器的规模仅仅是一个方面。一系列的加速过程增加了粒子运动的能量,物理学家发现用电子伏(eV)这个术语来描述粒子的能量非常方便。一个电子伏就等于一个电子穿过一伏特电压时获得的能量。伏特是电势的标准单位,电势表示的是移动电荷的能力。普通手电筒电池提供的电压,大部分都是 1.5 伏特。

费米实验室的 Tevatron 加速器可以给质子提供接近 1 万亿电子伏的能量,如此高的能量可以实现物理学家想观察的非常剧烈的碰撞。这些粒子以接近光速的速度运行。有一种使能量变得更高的方法是,让两个以这个速度运动的粒子发生正面碰撞,从而使能量翻倍。被叫做碰撞机的加速器系统就是为实现这个目的而设计的。费米实验室的碰撞机可以产生接近 2 万亿电子伏的碰撞。而大型强子碰撞机计划拥有 14 万亿电子伏碰撞的能力。由于这些能量如此巨大,人们有时候就把粒子物理学叫做“高能物理学”。

一旦碰撞发生了,物理学家必须要能观察到结果才行。粒子以及碰撞之后的“残

骸”都非常小，用肉眼或者显微镜是根本看不见的，所以必须采用其他的方法。这些方法通常都要用到电离，类似于第 1 章提到的盖革计数器检测辐射的过程，盖革计数器是粒子物理学实验中最早使用的检测器之一。两种旧式的检测装置是泡室和云室。由于泡室液体或者云室蒸汽的电离，高速运动的粒子得以在这些仪器中现身。泡室中的液体接近它的沸点，当有高速粒子通过形成离子时，一些液体便蒸发形成容易观察得到的泡沫。在云室中，电离过程产生出云烟，类似于喷气式飞机留下的气体痕迹。

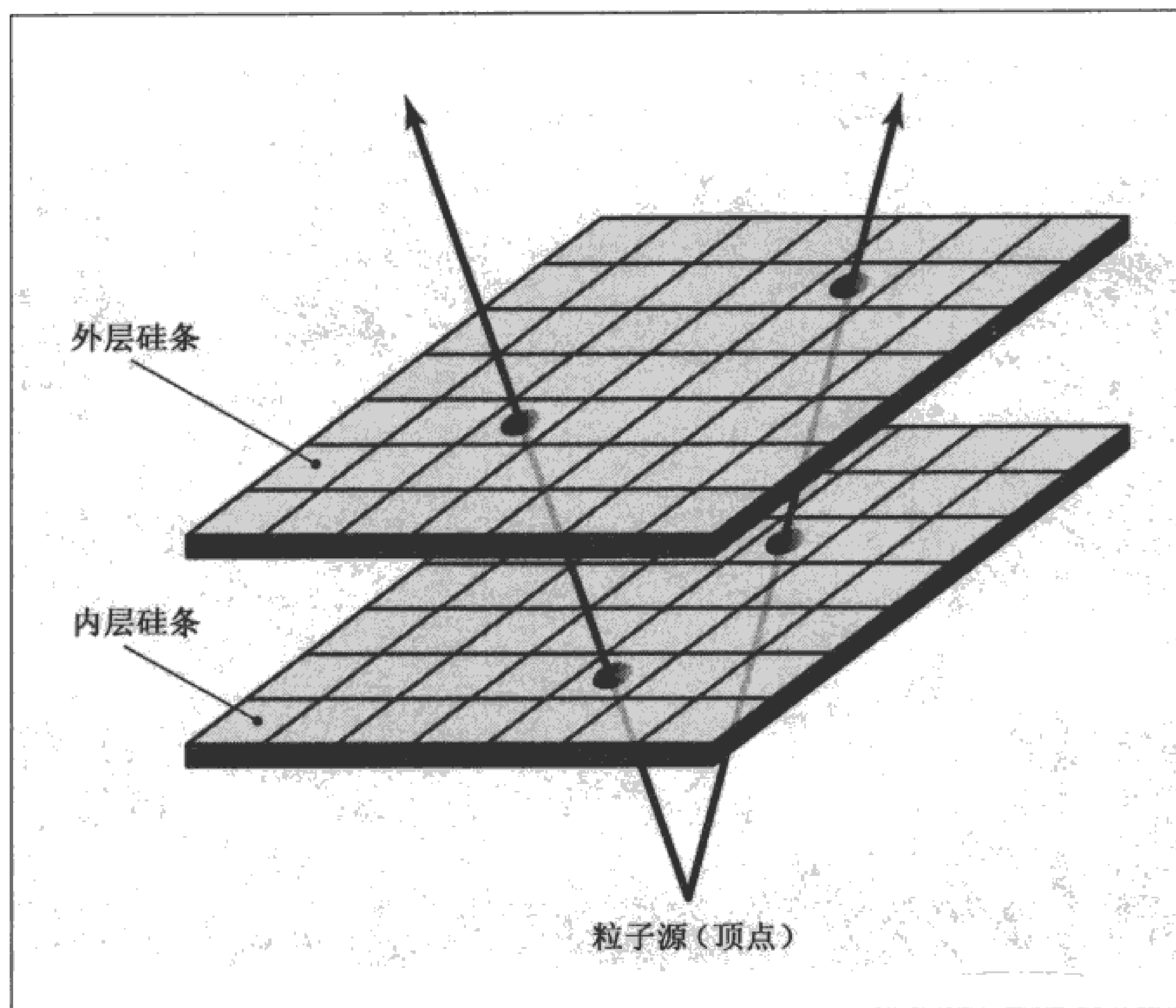


这是费米实验室 1999 年的鸟瞰图，图中前面部分是“主注射器”(the Main Injector，一台质子同步加速器)，后面是万亿电子伏特加速器 Tevatron。(费米视觉媒体部/弗雷德·乌尔里克)

其他一些更新的检测器使用的是电子设备。丝室是平行分布的电线网络。通过高速粒子的电离作用形成的离子流到电线上产生电流，电流由灵敏的仪表来测量。电流在电线网络中的位置就提供了有关粒子轨迹的信息。另一种检测装置是顶点探测器，如后图所示。这是一种非常灵敏的仪器，它由排列整齐的硅条构成。粒子穿越硅条时产生少量的电荷，由计算机根据这些电荷的位置来确定粒子的轨迹。

粒子物理学实验可以提供大量的信息。正因为这样，卢瑟福通过散射实验发现了

原子核,这在第1章中介绍过。粒子之间发生碰撞或者粒子与静止的原子或分子发生碰撞,而物理学家研究碰撞后的粒子的身份和轨迹。碰撞的能量如此之大,可以形成各种各样的粒子,这些粒子所带的电荷——如果有的话,以及它们的质量都是很重要的信息。科学家们通过各种方法来测量这些属性,例如在磁场中观察粒子弯曲的运动轨迹,前面提到过,这个轨迹和粒子的电荷和质量都有关。



粒子穿过这两层硅条时会形成少量的电荷。计算机利用这个信息来描记粒子的运动轨迹。如果粒子来源于同一次事件,那么它们的轨迹便会在顶点或交点汇合。

所有这些实验都必须重复很多次,因为任何单次实验的结果都是不可预测的。正如两辆车相撞后可能处于各种不同的位置,可能有各种各样的损坏,粒子相撞也会出现多样的结果。由许多科学家组成的研究小组必须去研究大量的信息。在如此众多的科学家之间共享这些信息显得如此必要而又如此困难,于是在1989年,CERN的一位科学家提姆・伯纳斯-李(Tim Berners-Lee)创造出一种组织这些信息并使其能够

通过计算机网络轻易获取的方法。这个系统非常成功,很多人决定加入进来,最终成为了今天的万维网。美国第一个网站就属于斯坦福直线加速器中心。

粒子加速器不仅仅是万维网的诞生地,它还是生产医学程序中使用的离子束的工厂,例如第1章讲到的放射治疗。然而,最大的加速器耗资数十亿美元,而且需要有成百上千的工作人员。美国曾计划在德克萨斯州建造一台巨型加速器,但在工程的初始阶段耗费超过10亿美元后,政府在1993年决定叫停这项工程,而不愿在上面花更多的钱。然而,粒子加速器所取得的科学成就是巨大的,为我们提供了有关物质的非常丰富而详尽的知识。

所有物质是由什么构成的

前面的章节介绍过物理学家是如何发现原子是由原子核和绕核运动的电子组成而原子核又是由质子和中子组成的。宇宙射线实验产生了许多之前不为人知的粒子,从20世纪中期开始,强大的加速器更是带来了大量新粒子的出现。这些粒子可以根据它们的质量、所带电荷符号以及其他一些属性来进行区分。这些新粒子的大部分寿命都很短,在导致它们诞生的碰撞过后的一瞬间便和其他粒子结合了或者衰变成更稳定(更持久)的粒子(不稳定的原子核会衰变成更稳定的原子核,不稳定的粒子也是一样的)。物理学家将这么数百种粒子汇编成一个目录,起初没有谁知道如此众多的粒子都是做什么的。有些人开始把这种现象形象地叫做“粒子动物园”。

针对这种状况,物理学家首先开始尝试对粒子进行分类,就像17、18世纪的生物学家开始对动物进行分类一样。物理学家根据粒子的质量将它们分成不同的类别——像电子、正电子和μ介子这些最轻的粒子,被划归到被叫做轻子的类别里面,而像质子和中子这些最重的粒子则属于重子这一类(这些类别的名称来源于希腊语,leptos是“小的”或“轻的”的意思,而baryon是“重的”的意思)。质量介于轻子和重子之间的粒子属于介子这一类。而强子则包括介子和重子这两类粒子。

如果粒子带电的话,它的电荷符号就是另一个非常重要的属性。美国科学家、政治家本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin)认识到电荷有两种,他将它们命名为正电和负电。电子带负电而质子带正电,通过观察一个粒子和磁体或电荷的相互作用,我们可以很容易地确定它是带正电还是带负电。没有电活动的粒子是电中性的,例如中子。这种粒子是不能用前面介绍过的加速器进行加速的,但我们却可以通过许多其他手段来得到高速运动的中子束,例如可以将中子暂时地和其他带电粒子结合在一起。

自旋是粒子的另一个属性。之所以称之为“自旋”,是因为早期的一些物理学家认为它是一种旋转,后来发现并不是这样的。粒子的自旋只能用第2章讨论的量子理论来描述。自旋是量子化的——它只在特定的数量和特定的方向上存在。

许多人开始把这些粒子看成是最基础或者最根本的,认为它们是物质的最基本的单元。尽管这种想法很合适,人们还是不免怀疑这些粒子中的某一些是否是由更小的粒子组成的。20世纪60年代初期,默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann, 1929—)和乔治·茨威格(George Zweig, 1937—)两位物理学家提出了这样一种想法:强子这种更重的粒子是由一个小集合的微小粒子通过不同的组合构成的。这种观点非常有用,因为它把庞大的粒子数量缩减为一个我们更容易处理的基本粒子的小集合。这样的话,物理学家就能从“粒子动物园”中理出一点头绪了。在盖尔曼和茨威格的观点和其他一些理论的基础上,出现了一个涉及粒子之间的力和相互作用的模型。本章最后一个部分将介绍“标准模型”的模型。

在标准模型出现之前,一个被叫做正电子的有趣的粒子占据了很多人的时间和头脑。1932年,美国物理学家卡尔·安德森(Carl Anderson, 1905—1991年)在云室中研究粒子的轨迹时发现了这种粒子。在这次宇宙射线实验中,安德森观察到一个与电子质量相同但却带正电的粒子。正电子(带正电的电子)是人们与后来被叫做反物质的物质的第一次照面。因为这个发现,安德森和宇宙射线的发现者维克托·赫斯一同分享了1936年的诺贝尔物理学奖。

反物质

迪拉克曾经预言了正电子的存在,因为他在解复杂方程时,这个粒子出现在了答案中。这些方程跟电子的行为有关,其中有些解要求有一种与电子质量相同但却带正电的粒子存在。在迪拉克表达自己的理论之后不几年,安德森就发现了正电子。

事实上,迪拉克的理论具有普遍性,不仅仅适用于电子,而是适用于所有的粒子。每个粒子都有一个与自己在质量、自旋、电量以及其他一些属性上完全相同的“孪生兄弟”,所不同的只是一些属性的符号。“Anti-”是一个表示“相反的”的意思的前缀,所以这些孪生兄弟就被叫做反粒子(antiparticle)。正电子是电子的反粒子,反质子是质子的反粒子(反中子和中子一样也是电中性的,但在另外一些方面却是中子的反面,比如在磁场属性上)。正电子、反质子、反中子和其他反粒子都属于反物质。

地球是由物质而不是由反物质组成的。人们很快就找到了反物质不在粒子物理学实验之外的世界中存在的原因：当一个粒子和它的反粒子相遇时，它们都在爆发的能量中消失了。在第76、77页的知识窗中将讲到，这个过程就叫作湮灭，结果是两个粒子都被毁灭了，取代它们的是电磁辐射的高能光子。

我们也可以采取另一种方式来看待物质—反物质的湮灭过程：一个粒子和它的反粒子转化为另一种有着巨大能量的粒子，即光子。有着足够能量的光子也可以转化为一个粒子—反粒子对，这个过程叫做物质—反物质的生成。光子有着极强的适应性并且具有一个奇特的性质——物理学家相信光子的反粒子是光子。也就是说，光子是它们自己的反粒子。

正电子—电子对的生成需要一个高能的光子。因为质子和它的反粒子即反质子的质量比电子和正电子的质量大了大约1 836倍，所以质子—反质子对的生成需要多1 836倍的能量(大概是18.76亿eV)。质子—反质子对的生成需要能量极高的γ光子，所以其生成并不像正电子—电子对那样普遍。在诸如费米实验室的Tevatron这样强大的加速器中发生的碰撞能够产生超过1万亿电子伏特的能量，这个能量足够生成甚至更重的粒子—反粒子对。

反物质很难被制造，更难被保存，哪怕是很短一段时间。和物质的接触将导致反物质的湮灭(和同等质量的物质一起)，所以反粒子一定要远离它们各自对应的粒子。可是地球上的任何东西都是由物质构成的，包括盒子和其他容器，这就是个问题。所以，粒子物理学家保存反物质的方法是用电磁场来约束它，就像加速器约束或聚集带电粒子束那样。既然磁场可以使运动的电荷发生偏转，那么合理地配置磁体，就能使反粒子在碰到容器壁发生湮灭之前改变运动的方向。

反粒子能够聚集到一起形成原子，或者更准确地说，形成"反原子"，就和正常的物质一样。CERN的研究者在1995年制造出了第一个反氢原子，由一个正电子环绕着一个反质子。然而，反氢原子似乎并不稳定而且寿命也不长，至少在实验室里生成的那些反氢原子是这样的。

人们一直想知道在宇宙中是否漂浮着一些反物质甚至反原子。阿尔法磁谱仪(AMS)这种基于太空的仪器就是为寻找宇宙射线中的反物质而设计的。

AMS—01是其早期版本，1998年随"发现"号航天飞机飞入太空，可惜它并没有探测到任何反物质。许多大学和科研机构的研究者们密切合作，他们要建造一台更大、更完善的设备，即AMS—02，并计划在2005年将其发射升空。这台仪器将由航天飞机运送到绕地球运转的载人卫星——国际空间站上，AMS—02要在那里服役许多

知识窗

物质—反物质湮灭

物质和反物质的湮灭初看起来似乎是违反质量守恒定律的。这条定律说,化学反应前后的物质质量保持不变。但正如第 1 章所述,这个定律需要修正,因为爱因斯坦的质能方程将能量 E、质量 m 和光速 c 联系了起来:

$$E = mc^2 .$$

本书第 1 章讲到过诸如裂变和聚变等核反应是如何将少量的质量转化为巨大的能量的,转化是按照爱因斯坦的质能方程来进行的,而方程中光速 c 的值非常大,c 为 18.62 万英里/秒(30 万千米/秒)。即使是很小的质量 m,当乘上 c 的平方后,都可以转化出巨大的能量 E。反应和转变往往导致质量的改变,然而,质量和能量的总和在变化前后却是保持不变的。

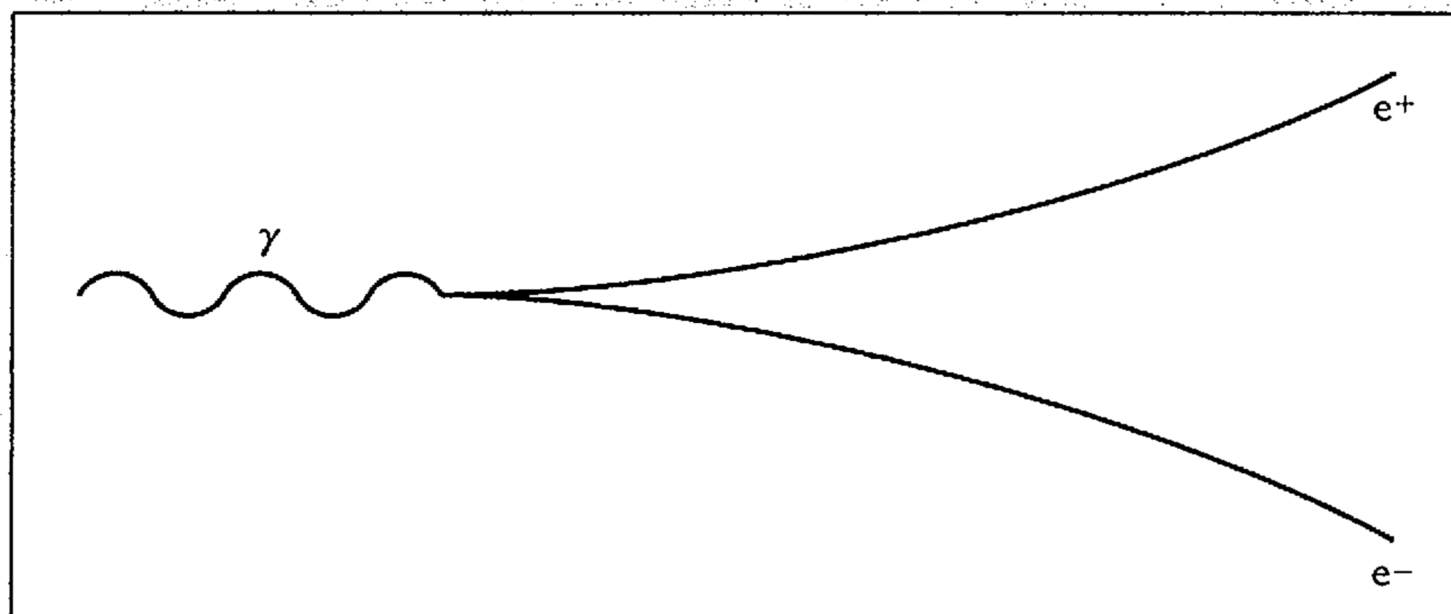
物质—反物质湮灭是一种相类似的质量到能量的转变,只是它的规模似乎更大。核反应转化的物质的质量往往不到总质量的 1%,而粒子和其反粒子的湮灭则几乎将两者全部的质量都转化为了能量。用电子伏特作单位,电子的质量加上正电子的质量再乘以光速的平方,产生出 102 万 eV 的能量。如果粒子在运动的话,也就是说具有动能,那么动能也会参与到光子的生成中去。由于具有足够的能量,结果是生成了 γ 光子,γ 射线是电磁频谱中能量最高的辐射。

年。然而,由于航天飞机方面的问题,2005 年这个预定时间已经过去了,研究者们希望能够在最近几年内开始进行实验。

几乎没有人会指望 AMS—02 能找到很多反物质,如果有的话。反恒星、反行星甚至反星系都是有可能存在的,但整个宇宙似乎主要还是由物质构成的。宇宙中有过的任何反物质可能很久以前就都消失了,它们一接触到物质就被湮灭了。虽然谁都不能肯定,有些人却相信在宇宙诞生的时候,物质略多于反物质。大部分物质和全部的反物质发生湮灭,结果是剩下一小部分物质继续充斥着宇宙空间。那么,为什么物质会多出那么一点?这个理论是正确的吗?这些问题都有待进一步探讨。本书第 5 章将论及宇宙,包括它的诞生。

即使在宇宙中可能不存在所谓的反原子,但反粒子的的确确出现在物理实验室以及一些重要的技术里面。反粒子的应用之一就是正电子发射断层摄影术(PET)。

这个过程也可以朝相反的方向进行，在这种情况下，102 万 eV 的能量转化为一个电子—正电子对，如下图所示。这是一个粒子—反粒子生成的例子，在这里，能量转化为物质(以及与其孪生的反物质)。当 γ 光子与一个原子的原子核发生碰撞时，这种事件就有可能发生，结果 γ 光子的部分或全部能量就被用于生成一个粒子及其反粒子。



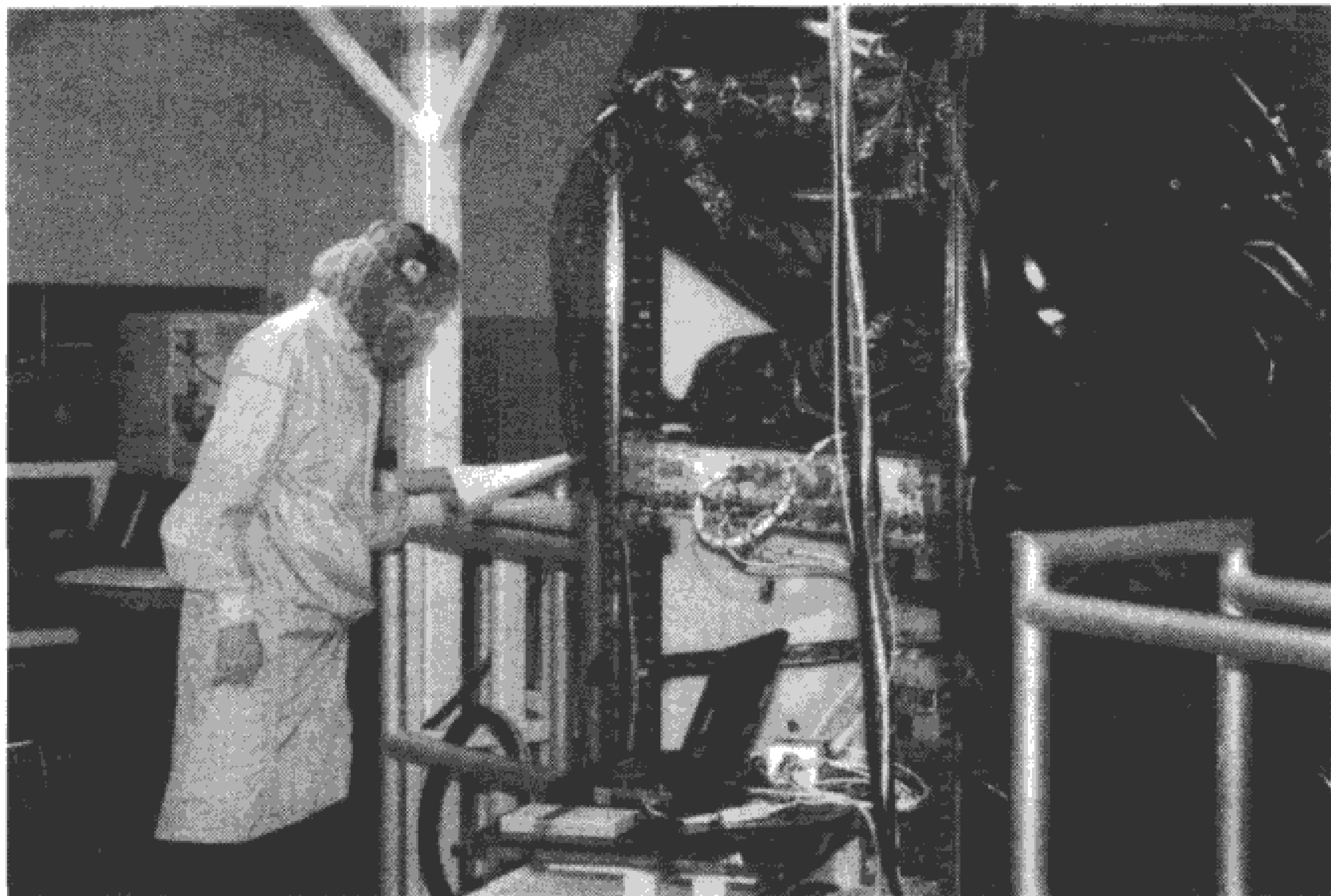
有时候，像一个高能的 γ 光子撞击一个大的原子核这样的事件生成一个电子(e^-)—正电子(e^+)对。一个与纸面垂直的磁场(未显示)使这两个带电粒子朝相反的方向发生偏转，因为两者的电荷符号相反。

用反物质给人体照相

医生和其他研究者使用 PET 可以得到人体内部的地图或影像，而无需动用手术。正电子和电子的湮灭是 PET 技术的重要部分。作为第一步，病人首先要被注射入包含放射性原子的一种物质。这种物质通常是被修改过的糖，人体正是通过糖的分解或者代谢来为机体细胞和组织提供能量。放射性糖分子被注入血液之后，就聚集到机体中那些需要大量代谢活动的活跃的部位。在那里，一些放射性原子开始衰变。

本书第 1 章讲过，放射性原子的原子核会发生衰变并发射出各种各样的粒子，发射粒子的种类与具体的原子核有关。PET 程序采用那些发射正电子的放射性原子核。这样的例子有碳 11、氧 15 以及氟 18 化合物。用于 PET 成像的分子包含这样的

一个放射性原子；例如，分子在它的结构中包含一个氧 15 原子，而在这个位置，正常情况下是一个稳定的氧 16 原子。这和第 1 章里提到过的放射性标记是很类似的。PET 所用放射性元素的半衰期既不太短也不太长，这样，大部分原子核都在到达代谢活跃的地点之后不久就开始衰变，而不是在此之前。



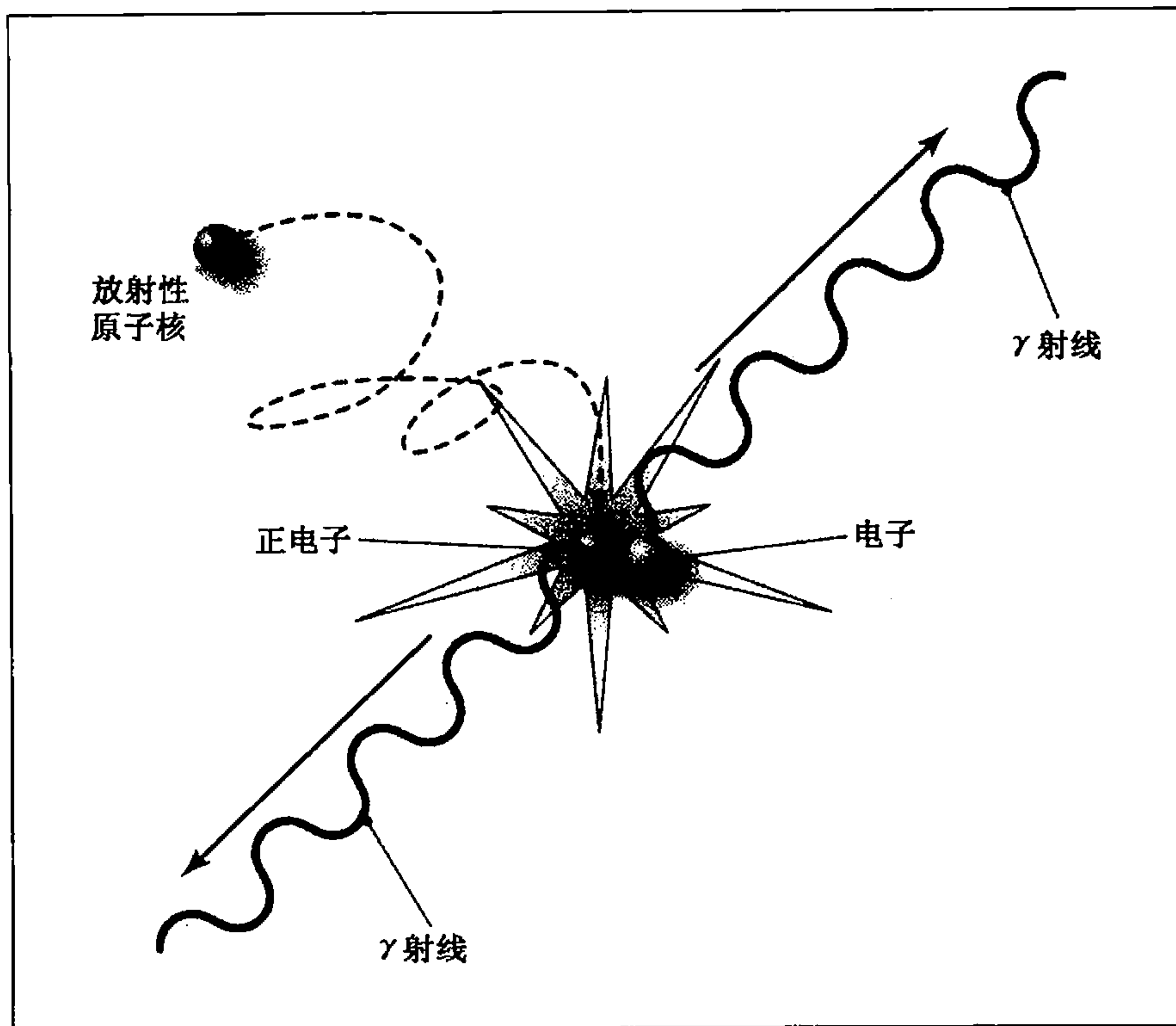
阿尔法磁谱仪 2(AMS-02)正在 NASA 肯尼迪航天中心接受检查，这台仪器将在太空中搜寻反物质的迹象。(NASA-KSC)

发射出来的正电子无需运行多远就能遇到电子，两者一旦相遇便发生湮灭。湮灭事件总是产生两个朝相反方向运动的完全相同的 γ 光子，如第 61 页图所示。

湮灭过程朝相反的方向送出两个光子，这是因为这样一对光子的动量为零，而有一条物理规律要求转变前后的动量保持不变。光子是没有质量的，而动量通常被定义为质量和速度的乘积，但光子确实是有动量的，因为它们具有能量(根据爱因斯坦的方程，$E=mc^2$，光子拥有等效质量)。湮灭过程产生的这两个完全相同的光子其动量是相等的，但它们的总和为零，因为它们的运动方向相反。这一点应该是对的，因为在大部分 PET 程序中，不管是正电子还是电子都是没有什么速度的，所以它们的总动量很小或者几乎为零。

PET 机的形状像一个圆环，光子探测器位于围绕病人身体的一个环内。探测器搜寻那些具有正电子—电子湮灭的能量特征且朝相反方向运动的光子。机器记录每

一对光子到达探测器的时间，然后利用这个信息来计算它们的来源。通过对湮灭事件进行定位，PET 能够大致确定放射性分子位于机体的哪些部位(这种计算并不是非常精确的，因为正电子在遇到电子之前经过了一段未知的路程，但这个距离通常不会太远)。那些代谢活动旺盛的机体区域将发射出更多的 γ 射线，这样，PET 就可以生成反映所研究区域的活动水平的图像。



放射性原子核衰变，放射出一个正电子。正电子晃荡不多远便遇到一个电子，两者相互湮灭，生成 2 个 γ 光子。

医生经常使用 PET 来发现肿瘤(异常生长)。这些肿瘤细胞快速地生长和分裂，要消耗大量的能量。代谢活动为这种快速生长提供动力，而对于定位高水平的这种活动来说，PET 表现得相当出色。在这里，PET 为医生提供了一种绝佳的工具，让他们无需切开病人的机体就能发现异常的组织，免除了病人的很多痛苦，也免除了被感染的风险。

研究者使用 PET 来研究器官和组织的代谢活动。PET 研究的一个重要目标就是大脑，这是一个有着很高的代谢率的器官。当脑细胞处理感觉信息、作决定以及执

行其他一些包含产生人类思维和意识的神秘过程的任务时，它们就会变得更活跃。使用 PET 来对人脑成像的科学家能够得到一系列的快照，显示出大脑中最活跃的部位。这些图像使科学家对大脑如何工作有了一个更好的理解，虽然这种理解还不完整。例如，一个正在观看图片的人的 PET 图像显示，在大脑皮层这个重要脑结构的某个特定区域有很强的活动。这个实验就可以表明这个脑区在视觉中的重要性。

用反物质推进宇宙飞船

反物质的应用并不仅仅局限于医学和脑研究。粒子—反粒子湮灭是目前所知的获取能量的最高效方法——高达 100％的质量变成了能量。这比核能高出了一大截，更是比燃烧汽油等燃料的效率高出数十亿倍。人们已经设想出了由从物质—反物质湮灭中获得能量的发动机推动的宇宙飞船。这样的发动机在一些虚构的飞船中是很常见的，例如电影和电视剧《星空奇遇》中的“进取”号，但在现实中这样的发动机并不存在。然而，这种想法并非不可思议的。

NASA 的先进概念研究所(NASA's Institute for Advanced Concepts)为诸如反物质这样的新式火箭推进技术研究提供了资金支持。正电子和反质子是考虑用于这类发动机的最常见的反粒子。正电子—电子湮灭生成的 γ 射线的能量比质子—反质子湮灭低，但因为高能级的 γ 射线非常危险并且难以利用，所以正电子—电子湮灭可能是一种更好的选择。然而事实上，任何能级的光子都是难以驾驭的。质子—反质子湮灭往往是一个更加复杂的过程，它在生成 γ 光子之外还产生其他的粒子，这些粒子也许可以在产生发动机推力中发挥更大的作用。

不管在哪种情况下，我们都可以使用电或磁的方法来约束反物质，再让湮灭释放出巨量的能量。反物质推进技术最大的障碍就是如何获得反物质。除了放射性衰变和诸如费米实验室 Tevatron 等巨型粒子加速器中发生碰撞时释放的微量反物质之外，我们找不到任何其他的反物质来源。生产反物质所需耗费的成本使之成为了地球上最昂贵的物质之一——大约每盎司 1 100 万亿美元(＄40 trillion/g)。虽然一次快速登上火星的旅行只需要很少量的反物质，但仍然需要花费数十亿美元。

更新、更大的粒子加速器，例如 CERN 的大型强子碰撞机，可以大大加快世界上反物质生产的速度，但即便是有了这些机器，反物质仍将非常稀少。靠物质—反物质湮灭推动的宇宙飞船仍然只是科幻小说的创意，然而这种想法并不是空谈。如果我们能够找到反物质的丰富来源，人类将惊奇地发现自己正在驶往遥远的星球。

标准模型:基本粒子及其相互作用

反物质及其应用是粒子物理学的一个重要方面,然而科学家希望有一个更普遍的概念或理论能够用来描述粒子、反粒子及其相互作用。当今被普遍接受的一个理论就是标准模型。“模型”这个词本身可能含有不太成熟的意思,但在 20 世纪 70 年代物理学家发展出标准模型之后,它已被实验证实过很多次。

标准模型的重要成分是一种被叫做夸克的粒子。最早提出存在这些粒子的科学家之一的盖尔曼,用詹姆士 · 乔伊斯(James Joyce)1939 年的小说《芬尼根守灵夜》(Finnegans Wake)里的一个词来命名这些粒子。根据这个理论,所有强子都是由夸克组成的——重子由 3 个紧紧捆在一起的夸克构成,介子由两个夸克构成。描述夸克行为的数学公式是很复杂的,但最终由盖尔曼、茨威格以及其他一些物理学家发展出来的这种思想极大地简化了“粒子动物园”。

一共存在 6 种夸克(和它们的反夸克),这些粒子的不同组合就构成了强子家族,包括质子和中子。夸克简化了粒子物理学,就像俄国化学家德米特里 · 伊万诺维奇 · 门捷列夫(Dmitri Ivanovich Mendeleyev)在 1868 年简化了化学一样,门捷列夫找到了一种方法来对元素排序,那样它们就形成了一张表,这就是著名的元素周期表。对化学家来说,元素是组成化合物的基本单元;而对粒子物理学家来说,夸克是组成强子的基本单元。

一些人起初对夸克表示质疑,主要是因为它们所带的电量很不寻常。电子仪器是相当灵敏的,物理学家可以非常精确地测量粒子和物质所带的电量。早在 20 世纪初期,人们就已经知道电子和质子所带的电量相等(但符号相反),这也是所找到的最小的电量。但理论却要求夸克带有更小的电量——一些夸克所带电量为电子(或质子)电量的 1/3,另一些夸克所带电量为这个电量的 2/3。在盖尔曼和茨威格首次提出夸克这个概念的时候,并没有发现过任何带有这些电量的粒子,直到今天也是如此。物理学家从来没有发现过任何自由的、孤立的夸克,它们只在重子和介子中存在着。

尽管没有直接的实验证据的支持,物理学家还是很相信夸克是真实存在的。这个理论曾预测过新强子的存在,这些新粒子随后便被发现,这使人们对其正确性有了更大的信心。标准模型出现后,它提供的公式成功地预测了粒子的属性以及大型加速器中碰撞实验的结果。大多数人对标准模型以及夸克的存在都是有信心的。

从来没有加速器实验产生过孤立的夸克(存在于强子之外),这是有理由的。将夸

克束缚在强子里的是一种叫做强力(也叫强核力)的很强大的作用力,这在第1章中提到过。要让夸克摆脱这种力的束缚需要非常巨大的能量,即使是能产生上万亿电子伏特能量的现代粒子加速器也对此无能为力。

这6种夸克的名字有点古怪:上、下、奇、粲、顶和底。但夸克并不是唯一的基本粒子。前面提到的轻子这类粒子并不由夸克组成,而是独立存在的。一共有6种轻子:电子、μ介子、τ介子以及3种类型的中微子。μ介子和τ介子的属性和电子相似但质量更大。在这些粒子中,只有电子是物质的常见组成成分。诸如太阳内部的核聚变这样的过程产生大量的中微子,但这些粒子极少和其他物质发生相互作用,因此很难被探测到。中微子的质量或者中微子是否有质量,这些问题一直是争论的焦点,但现在很多人都相信,这些难以捉摸的粒子确实是有很小的质量的,尽管没有人能确切地知道这个质量是多少。

描述基本粒子仅仅是标准模型的一部分。这个理论的另一个重要方面就是探讨粒子间如何相互作用。相互作用导致了力的产生,一共有4种形式的力——电磁力、弱力、强力和引力。第1章讨论过强力和弱力(也叫弱核力),在核反应中涉及了这两种力。电磁力包括磁体和电荷彼此之间的相互作用力。而引力是物质之间的吸引力。

在这4种力中,引力远远是最弱的一种力,甚至比弱力都要弱得多。因为其他3种力比引力强得多,所以在粒子这个微小尺度上,引力的作用是不显著的,可以忽略不计。当然,只在这些微小的尺度上是这样的。弱力和强力是短程力,它们只在短距离内起作用,其强度随着距离的增大而急剧降低。而引力虽然弱,但其强度随距离的变化就要慢得多。介子中的一对夸克通常是肩并肩靠在一起的,在这个短距离上,强力要远远大于这两个夸克之间的引力。然而,随着距离增大,强力迅速减降为零,这时,对于不带电的物质来说,引力便是它们之间最主要的作用力(电磁力随距离变化的速率和引力一样,但却比引力更强大,对于带电物体来说,它是一种比引力更重要的力)。因为在粒子这样的微小尺度上,引力可以忽略不计,所以标准模型的现有版本只涉及了强力、弱力和电磁力。

一说到力,人们就经常想到推或拉,这种简单的概念是理解力的一种有效的方式。但粒子物理学是从粒子交换的角度来描述力的,这种想法并不好理解。日本物理学家汤川秀树(Hideki Yukawa, 1907—1981)在1935年第一次提出了这种观点。为了更好地理解汤川秀树的观点,我们可以拿那些彼此共享或者交换电子的化学元素形成的化学键来作为类比,例如,那些将两个氢原子和一个氧原子连接起来形成水分子H_2O的化学键。汤川秀树认为,强力所形成的“连接”可能是以某些未知粒子的交换为基础

的。这个观点是标准模型中对力的现代理解的基础，汤川秀树因为他的努力获得了1949年的诺贝尔物理学奖。

根据标准模型，有一组专门的粒子负责携带或传递粒子间的所有的力或相互作用。每种力都有自己专门的传递粒子。胶子传递强力（胶子把夸克胶在一起），玻色子传递弱力，而光子传递电磁力。粒子之间之所以有力的发生，是因为它们彼此交换着这些传递粒子，就像玩投接球游戏一样。那么，这个过程是怎样变成"推"或"拉"这些简单的日常概念，目前还不是很清楚。但由这个理论引出的数学计算及其预测却与加速器的实验结果吻合得很好。

尽管有很多证据表明这些力的传递粒子是存在的，我们却很难或者说根本不可能探测到它们。普通的光子是能探测得到的，但传递力的光子是一种虚光子。虚粒子不知道是从哪里跑出来的，这种现象是质量和能量守恒定律所不允许的，因为这个过程似乎创造出了质量或能量。然而，虚粒子的作用却是实在的，它们虚幻的存在是由于某种不确定性，这就是第2章讲过的海森堡的测不准原理。

根据海森堡的测不准原理，某一对特定的测量不可能同时都是精确的。一个粒子的位置和它的动量就是这样的一对测量，如果我们对粒子的位置知道得越精确，那么我们对它的动量就知道得越不精确。这种平衡意味着，我们也许可以完全准确地知道一个粒子的位置，但如果那样的话，我们对这个粒子的动量将一无所知。或者反过来，我们也许可以完全准确地知道一个粒子的动量，但如果那样的话，我们对它的位置将一无所知。

另一对要承受不确定性的测量是能量和时间。这就是说，一个粒子的寿命和它的能量不可能同时都是完全确定的。结果，像虚粒子这样的寿命极短的粒子就能够短暂地存在，而它们几乎一瞬间就消失了。没有人能够观察到它们的质量或能量，所以也就谈不上违反质量和能量守恒定律了。

传递力的胶子和玻色子也是虚粒子。虚粒子的整个概念都是很奇特的，因为人们已经习惯于日常生活中以码或米为尺度的物理学。在理解量子理论时人们面对的也是这种情况。粒子尺度上的物理学引入的一些新观念和新物体并不那么容易把握，因为人类的心智是在这样一个世界中发展出来的，在这个世界里，岩石之间发生碰撞并碎裂，而不是粒子之间通过交换虚粒子来传递作用力。然而，这个理论的数学方法是正确的，而且粒子加速器实验积累的大量证据也支持了这个理论。

然而，标准模型并不是故事的结束。尽管引力在粒子水平可以忽略不计，但如果缺乏对这一作用力的理解，物理学就是不完整的。直到今天，物理学家还不知道怎么

将引力整合到已被普遍接受的统治粒子物理学的理论中去，虽然大多数人都相信存在一种传递引力的叫做引力子的粒子，它和其他力的传递粒子类似。然而，目前对引力的研究似乎走的是一条和标准模型不同的道路。下一章将继续这个话题。

对粒子物理学来说，建造和维护用于进行更大更好的实验的巨型加速器是一项非常昂贵的支出。粒子物理学家要和其他科学家竞争政府和私人机构的经费支持，但尽管粒子物理学有诸如治疗癌症的粒子束以及 PET 成像这样的重要应用，粒子物理学家有时还是发现自己处于竞争的劣势地位。粒子物理学已经揭示了有关物质和力的一些最根本的性质，跟加速器实验相联系的巨大能量是我们研究宇宙的必不可少的工具。物理学在小尺度上完全可以而且正在产生大结果。

4
相对论

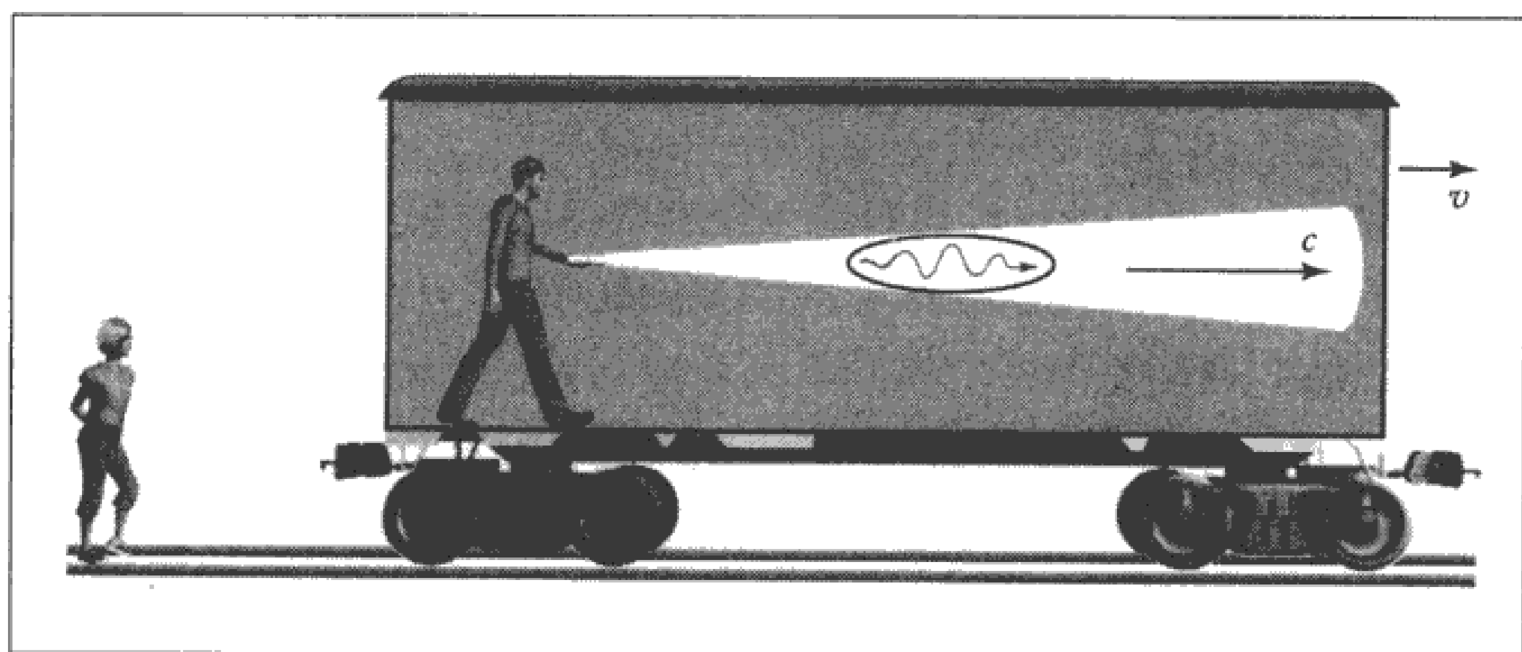
在19世纪60年代，苏格兰物理学家和数学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell,1831—1979)找到了一种方法，将电物理学和磁物理学联合成一个统一的方程组。这些方程揭示了电和磁的深层联系，而且公式表明存在一种以固定速度运行的电磁波。当麦克斯韦意识到这个速度和光速相同时，他明白了原来光是一种电磁波。他还预测了其他电磁波的存在，几年之后，德国物理学家亨利希·赫兹(Heinrich Hertz,1857—1994)发现了无线电波，这也是一种电磁波。

这些电磁波的一个令人迷惑的特性就是它们固定不变的速度。在没有物质存在的情况下，或者说在真空中，光和其他电磁波以18.62万英里/秒(30万千米/秒)的速度运行(电磁波在物质中传播时速度要降低)。这个速度快得惊人，但光并不是瞬时的——它从一个点到达下一点还是需要时间的。麦克斯韦的方程有一个让人困惑的地方，那就是它们表明光的速度是不会改变的(光从一种物质转移到另一种物质除外)。

固定不变的速度是没有多大意义的，因为在日常活动中，速度都是相对观察者来说的。举个例子来说，假如有一只狗在一列以50英里/小时(80千米/小时)的速度行驶的火车上沿着过道以3英里/小时(4.8千米/小时)的速度向前走。那么，对于一个坐在火车上的人来说，这只狗以3英里/小时(4.8千米/小时)的速度经过他的或她的座位。但对于一个站在火车站看着火车经过的人来说，这只狗似乎是以53英里/小时(84.8千米/小时)的速度在前进——狗行走的速度加上火车的速度才是这只狗从静止的观察者面前经过的速度。然而，麦克斯韦的理论却表明光不是这样的。如果有人在行驶的火车上照出一束光，那么不管是对于坐在火车上的观察者还是对于火车站静止的观察者，光束运动的速度都是一样的。下图对这一点做了解说。

有关麦克斯韦的电磁波的另一个令人困惑的方面就是，它们似乎不需要任何物质

的传递就能进行传播。波是通过某种媒介来传播的振动——例如，声音是一种依靠空气分子的运动来传递的波，而海浪则沿着水面运动。人们认为电磁波应该需要一种物质来传递它们的运动，他们就把这种物质叫做以太。以太被假定充满了所有的空间，而电磁波则被假定为以太这种物质的振动。为了解释麦克斯韦理论中电磁波的固定不变的速度，许多科学家都认为这个固定的速度应该是相对于以太而测得的。在前面描述的火车上的光束的例子中，实际上，坐在火车上的观察者和外面静止的观察者测得的光束的速度是不相同的，就跟他们得到了狗的不同速度一样。只有相对于以太的光速才是固定不变的。



火车以速度 v 行驶，一位乘客向前照出一束光。乘客观察到光的运行速度为 c。因为火车相对于静止的观察者来说在以速度 v 向前运动，而光线相对于火车来说又在以速度 c 向前运动，所以静止的观察者应该观察到光的速度为 $c+v$。虽然在大多数这样的情境下，速度是相加的，但在这里却不是这样。

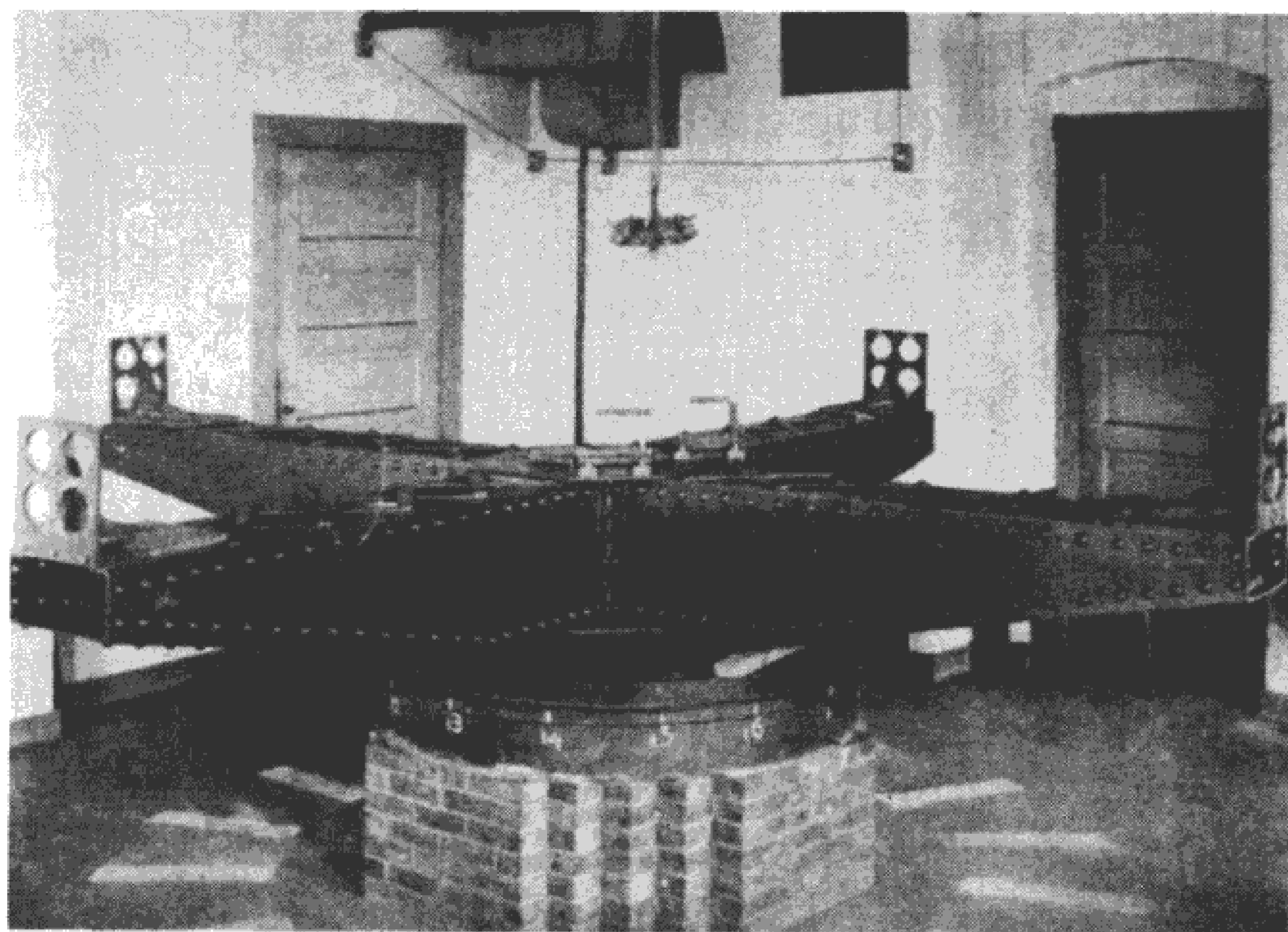
有关以太的观点，从日常物理学的角度来看是很合理的，但它却是错的。挑战这个错误观点并找到正确解决方法的物理学家是阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein，1879—1955)，这是一位睿智的思考者，他的创造力以及科学精确性产生了持久的影响。前面的章节已经讲述过爱因斯坦的一些工作，这一章介绍相对论——集中于爱因斯坦的观察者概念、相对运动和物理学规律的一些观点。这些观点几乎改变了一切，从对物理学的认识到对宇宙的看法。

阿尔伯特·爱因斯坦的假设

为了证实以太的存在，科学家希望能进行一次类似前面提到的光和火车的实

验。因为光速很大，所以快于火车的运动是必要的；否则，由不同观察者测量到的速度差异将会很小而无法检测。阿尔伯特·迈克尔逊（Albert Michelson，1852—1931）和爱德华·莫雷（Edward Morley，1838—1923）在 1887 年利用地球的运动进行了一次最著名的检验以太理论的实验。后面的知识窗介绍了他们的实验程序。

迈克尔逊和莫雷并没有发现因地球在以太中运动而导致的光速的变化。对这个结果的一个可能的解释就是光速在任何情况下都是不变的。这种解释就等于是承认麦克斯韦的理论不需要以太的存在，所以光速对所有观察者来说都是完全相同的。即使在迈克尔逊和莫雷的实验之后，也几乎没有人愿意接受这种不寻常的观点，但阿尔伯特·爱因斯坦是个例外。爱因斯坦在 1901 年获得了一个物理学的学位，但此后不久他在瑞士专利局找了一份工作，却不能去教物理学（似乎是因为至少有一位教授不喜欢他，而给用人单位写了有关他的一些负面的东西）。1905 年，爱因斯坦发表了一篇论文描绘了狭义相对论的轮廓。



这台由爱德华·莫雷和他的一位同事使用的干涉仪与阿尔伯特·迈克尔逊和莫雷在他们的实验中所使用的仪器非常相像。（AIP 埃米利奥·塞格雷视觉图片室）

知识窗

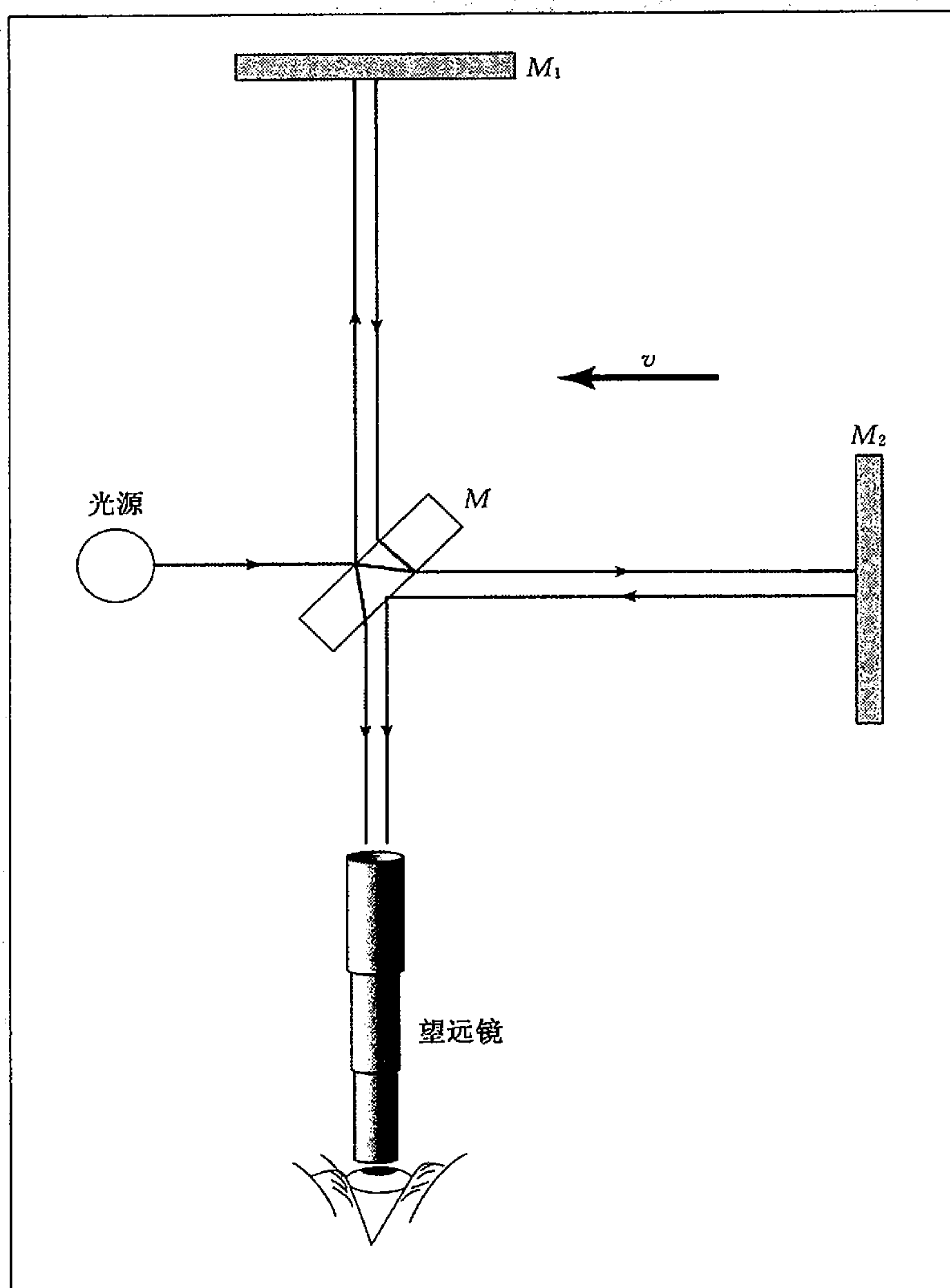
迈克尔逊-莫雷实验

迈克尔逊和莫雷利用了地球的运动，因为地球运动的速度足够快，使得有可能检测到以太的效果，如果它真的存在的话。地球的轨道半径 R 大约平均为 9 300 万英里(1.49 亿千米)，所以地球完整运行一周大约是 $2\pi R = 5.84$ 亿英里(9.34 亿千米)。(这个计算把地球的轨道近似地看作是一个圆，故而使用了周长公式 $2\pi R$。虽然地球的轨道略偏椭圆，但这个计算的误差并不会很大。)地球走过这个路程需要一年的时间，大约是 365.25 天或 8 694 小时。因此，平均速度为 5.84 亿英里(9.34 亿千米)除以 8 694 小时，结果等于 6.7 万英里/小时(10.7 万千米/小时)。这仅仅是光速的大约 0.01%，但却是可以测量得到的。

实验者比较了在地球运动方向上的光的速度和与地球运动方向垂直的光的速度，而地球是在假定的以太中运动的。下图是实验的图示。一面部分镀银的镜子 M 将光束的一部分反射到完全镀银的镜子 M_1，而让光束的另一部分通过后照射到完全镀银的镜子 M_2 上。根据以太理论，当光的方向与地球运动方向相同时，地球在以太中运动的速度将会加到光速上，而当光的方向与地球运动方向相反时，地球的速度则要从光的速度中减去。因为没有谁知道太阳系及其行星相对于以太的朝向，所以迈克尔逊和莫雷在不同的位置和时间重复了它们的实验。

部分镀银的镜子 M 充当了一个光束分裂器，允许从光源过来的一部分光通过，而反射剩余的部分。如果指向镜子 M_2 的通路和图中所示的地球速度 v 平行，那么指向镜子 M_1 的通路则与地球速度方向垂直。这样，M_1 光束的速度将不会受到影响，而 M_2 光束却要改变速度，如果光速并不恒定的话。M_2 光束在一个方向上的速度为 $c-v$，而在另一个方向上的速度为 $c+v$。如果真的是这样，那么 M_2 光束的平均速度将小于 c。要注意的是平均速度并不是通过将两个速度相加之后除以 2 来得到的，如果那样做的话，就会得到一个错误的答案 c。不能使用这个简单的公式的原因是光束在其中一个方向上运行的时间要比另一个方向长。因为运行的距离是一样的，所以光束以速度 $c-v$ 运行要比以 $c+v$ 花更多的时间，所以它的平均速度要小于 c。

这种实验配置产生出了一种灵敏的测量仪器，即干涉仪。干涉仪利用波的干涉属性来测量光在速度或者路径上的差异。在实验中，有一束光(根据以太理论)先减速而后加速。这是因为这束光先逆着地球运动的方向而后又顺着地球运动的



迈克尔逊和莫雷所使用的实验设备包括一个光源;一个部分镀银的镜子 M,它传递一部分光而反射剩余的光;在成直角的两条通路上的两个反射镜 M_1 和 M_2;还有一个观察点用来观察结合后的光束。

方向,所以地球运动的速度先从光速中减去而后又加到光速上。这就是图中朝镜子 M_2 运动而后又从镜子 M_2 返回的那束光。两束光随后发生结合,结合到一起的

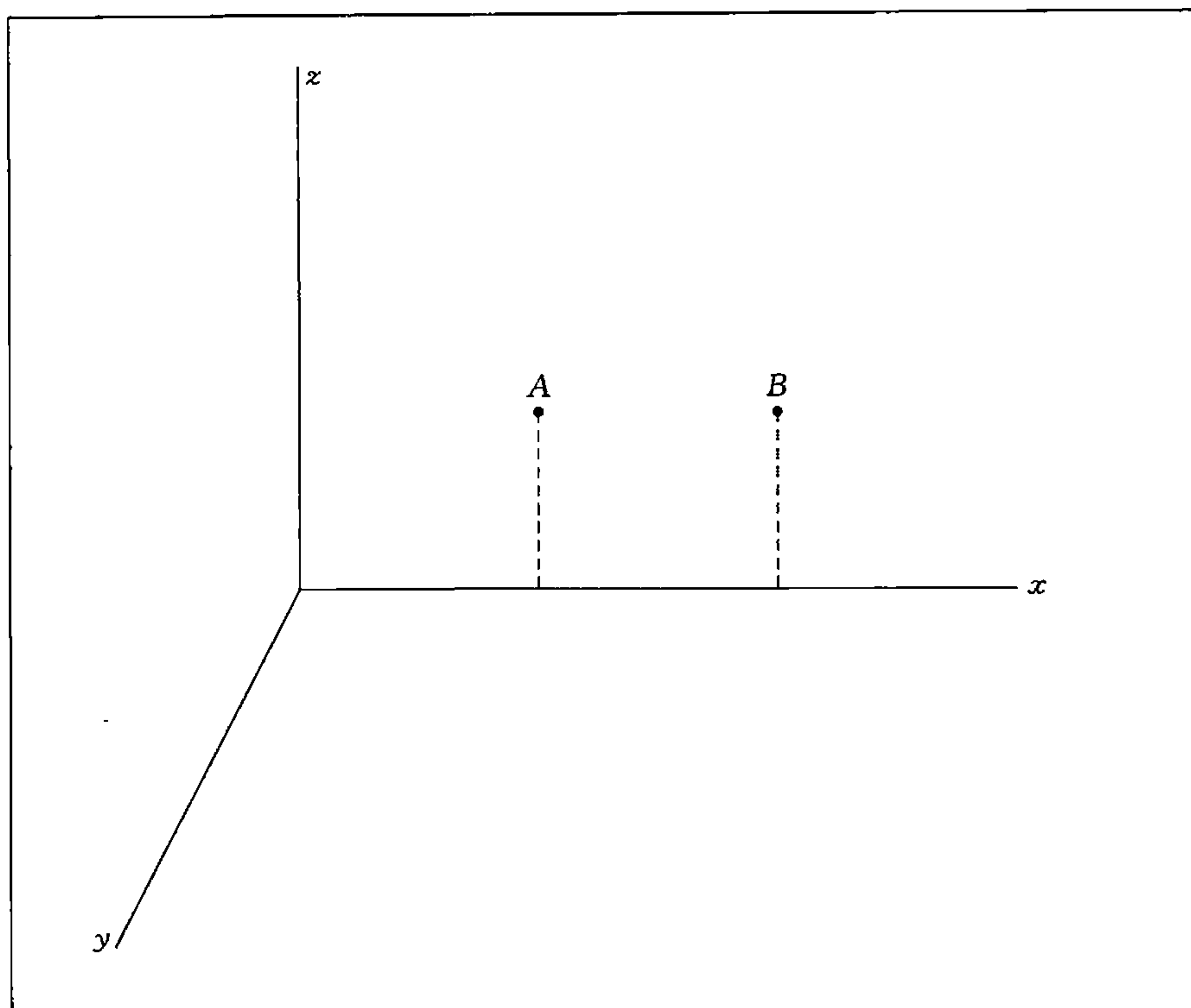
波彼此干涉，例如，当一列波处于波峰时，另一列波可能刚好处于波谷，于是两列波就相互抵消了。干涉仪中两束光由于所走过的路径不同，便会导致一些波彼此抵消，产生暗带，而另一些波则叠加在一起（叠加发生在两列波都处于波峰时，于是结合起来的波便会更大），产生更亮的光。结果是形成一系列明暗光带，叫做干涉条纹。

迈克尔逊和莫雷将干涉仪旋转到不同的位置，试图发现干涉条纹发生的变化。如果其中一束光的速度发生了改变，那么干涉条纹就应该有所不同。然而，实验者并没有发现这样的差异。如果以太存在的话，它似乎并没有产生预期的效果。

爱因斯坦首先提出一个极其重要的假设来抛弃以太的概念。麦克斯韦的电磁方程表明光的速度是恒定的，上面提到过，正是这一点导致了固定的以太概念的产生。那个时候的物理学家认为以太提供了一个标准的参考系，在这个参考系里，运动可以被测量，例如光波的速度。如图所示，一个参考系就好比在空间中伸展的一个轴系。我们通过测量一个物体运行的距离，例如，从点 A 到点 B，再除以它所花的时间，就可以得到这个物体在某个参考系中的速度。以太被假定为一个绝对参考系，只有相对于以太运动了的物体才能被认为真正在运动，因为以太是唯一的处于绝对静止状态的物质。根据以太理论，以太是唯一一个麦克斯韦方程组能够适用的参考系，因为只有在这个参考系里面，光速才是恒定不变的。对于任何相对于以太来说在运动的观察者，麦克斯韦方程都需要得到修正。

爱因斯坦对麦克斯韦的理论印象非常深刻，他相信麦克斯韦发现的方程对所有的参考系都应该是一样的。如果仅仅因为测量所在的坐标系不同就要修改物理规律，这对爱因斯坦来说，是非常不可思议的。在一个被叫做相对性原理的假设里，爱因斯坦指出物理规律对于所有匀速运动的参考系来说都是一样的。之所以要求是匀速，这在稍后的讨论速度变化（加速）和引力的部分中会显得很清楚。爱因斯坦 1905 年的理论只适用于这种特殊情形（即匀速），故而得名为狭义相对论。

爱因斯坦提出了另一个假设，宣称光速对所有观察者都是一样的。这个假设再一次重申了麦克斯韦方程的结论。仅仅带着相对性原理以及对光速不变的确信，爱因斯坦继续演绎出了一些惊人的结果。



轴 x，y 和 z 构成一个坐标系或者说参考系。每根轴都与另外两根垂直(也就是说，任何两根轴都成 90°角)，其中 x 轴和 z 轴位于纸面所在的平面上，而 y 轴则从这个平面上突出(y 轴画得稍微有点偏是为了能看得见)。每个点，例如 A 或 B，都可以用它们相对于每根轴的位置来表示。图中画出了 A、B 两点沿着 x 轴的位置。

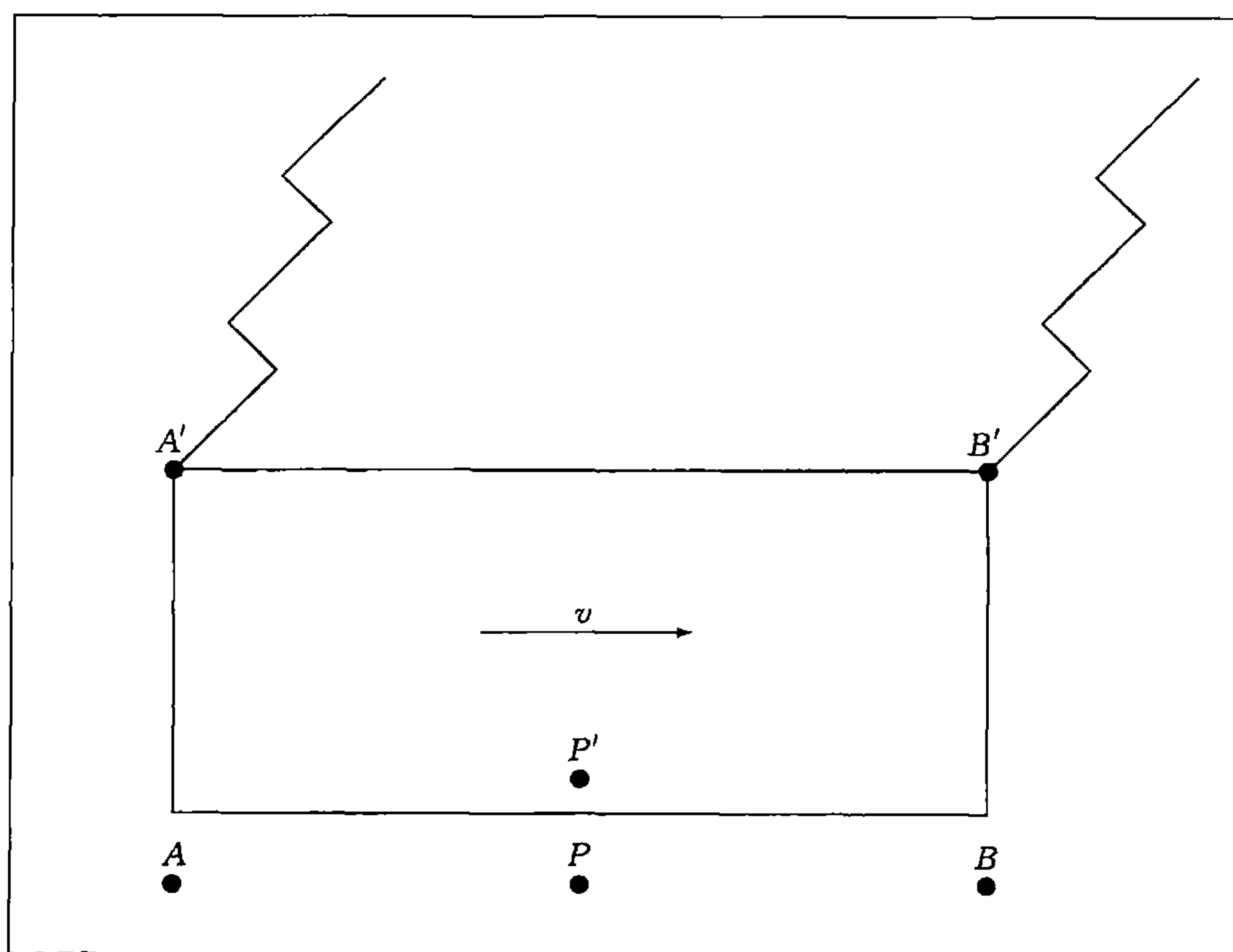
时间膨胀和长度收缩

事件总是在特定的地点发生，人们用一个参考系(坐标系)来描述这些地点，正如前面图中的 3 条相互垂直的轴。叫做空间坐标的 3 个数值分别表示到 3 条轴的距离，这 3 个数就确定了空间中的 1 个点。这是一个很老的概念了，早在几个世纪之前，法国哲学家和科学家勒奈·笛卡尔(Rene Descartes，1596—1650)就发明了它。爱因斯坦所意识到的是，时间与那 3 个空间坐标一样重要。在爱因斯坦的系统里，事件必须由 3 个空间坐标和 1 个时间坐标来描述。这就是时空系统。

时间之所以重要，是因为事件发生的时间跟观察者的参考系有关。为了理解这一点，请考虑一下下面图中示意的情形。假设有两道闪电击中了一列以速度 v 匀速行驶

的火车的两端。如图所示，闪电标记了火车上的 A' 和 B' 两点，同时也在这两点正下方的地面上留下标记，分别为点 A 和点 B。有一个观察者站在火车上距离两端相等的点 P' 处，另一位观察者则站在 P' 正下方的地面上的点 P 处。现在有了一个很重要的问题：这两道闪电是同时发生的吗？奇怪的是，这两位观察者在这个问题上无法达成一致！

假设 P 点静止的观察者宣称那两道闪电是同时发生的。这意味着，在 P 的参考系里，闪电发出的光从 A 点到 P 点与从 B 点到 P 点走过的路程相同，且它们同时到达 P 点。但是，火车上 P' 点处的观察者却有不同的参考系——行驶的火车。这个观察者正在以速度 v 驶向 B 点而以同样的速度驶离 A 点。光速对所有观察者都是一样的，火车前部闪电发出的光应该比后部闪电发出的光先到达 P' 点，这是因为前部的光所需走过的路程比较短，在光运行的同时，P' 点正以火车的速度 v 靠近前部的闪电而以同样的速度远离后部的闪电。在 P' 处的观察者看来，两道闪电并不是同时发生的，他报告说火车前部的闪电先发生。



闪电击中火车（图中的方框）前部的 B' 和后部的 A'，一位观察者位于火车中间的 P'。闪电同时在火车正下方地面上的 B 和 A 处留下标记，另一位静止的观察者站在 P' 正下方 A、B 两点中间的 P 处。

爱因斯坦相信，相对于他所在的参考系来说，每个观察者都是对的。这是相对性原理的要求，因为如果物理规律真的对所有的参考系都是一样的，那么每个观察者都应该能够做出正确的测量。这样一来，有点奇怪的是，某个事件发生的时间并非对所有人都是一样的，事实上它取决于观察者的参考系。时间是相对的。

在不同参考系中的观察者之间竟然无法达成共识，不少人一开始都很难相信这个古怪的结果。上面的例子表明，即便是简单的同时性判断，对不同参考系的观察者来说，也是不一样的。空间和时间都包括进来了，彼此发生相对运动的观察者对于相同的物体或事件却测量到了不同的长度和时间。对于一个静止的观察者来说，一个处于运动中的观察者的时钟走得更慢，而他的码尺收缩了。这些效应就是时间膨胀（时间流逝变慢）和长度收缩。知识窗给出了计算时间膨胀和长度压缩程度的方程式。

狭义相对论的效应显得如此不同寻常，因为在日常活动中我们根本就碰不到这样的情况。知识窗里给出的时间膨胀和长度收缩的公式包含了光速 c 的平方。因为 c 是如此巨大的一个速度，所以人们平常习惯了的慢得多的速度就显得微不足道了。只有当观察者之间的运动相对于光速 c 来说还算显著的时候，才有可能检测得到时间膨胀和长度收缩的效应。因为光速 c 为 18.62 万英里/秒（30 万千米/秒）或者大约 6.703 2亿英里/小时（10.8 亿千米/小时），所以要想检测到由火车或者汽车运动造成的时间膨胀和长度收缩，需要有非常高的精度才行。

相对性原理即物理规律对所有的观察者都是相同的，这是爱因斯坦发展他的理论的重要动机，但相对性也要求对牛顿在 17 世纪得到的公式作出一些修改。在牛顿公式中，粒子的动量是它的质量 m 与它的速度 v 的乘积，即 mv，这个数量在物理学中是很重要的，因为它是保持不变的——在力的作用前后或者碰撞发生前后，动量是守恒的。但在相对论中，质量为 m，速度为 v 的粒子的动量是由以下的公式给出的：

$$\frac{mv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

当 v 很小时，分母就很接近于 1，这样旧公式就近似为正确的。只有对于与光速有可比性的高速度，相对论的公式才与旧公式有非常明显的差别。

有时人们也把相对论的动量公式也理解为质量和速度的乘积，只不过在相对论中粒子的“质量”要由下式给出：

$$\frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

知识窗

狭义相对论的方程式

爱因斯坦研究了本章介绍过的行驶的火车等场景，在数学和几何学的基础上得出了这些方程式。这里不介绍方程的推导过程，通过一些数字来研究一下这些方程是挺有意思的。

假设运动着的观察者的速度为 v，下面的方程比较了静止观察者的时间间隔 Δt 与运动观察者的时间间隔 $\Delta t'$：

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

其中 c 是光在真空中的速度，$\sqrt{\ }$ 是平方根的符号（希腊字母 Δ，德尔塔，表示某个数量的变化，例如与时间间隔有关的时间的变化）。

分母是一个大于 0 而小于或等于 1 的数。如果 $v=0$，分母就为 1；因为除了光子没有任何其他物体能够达到真空中的光速，所以 v 一定是小于 c 的，这样分母就总是大于 0 的。除以一个小于 1 的数使被除数变大，所以 Δt 要么大于 $\Delta t'$，要么当 $v=0$ 时，两者相等。这也就是说，在静止的观察者看来，匀速运动（$v>0$）的观察者的时间间隔要更长，或者说时间膨胀了。

这个数量被叫做相对论质量，它随着速度的增加而增加。这个公式就表明了，为什么试图把一个有质量的物体或粒子加速到（或超过）光速终将是徒劳的。当 v 增大时，质量也增大，当 v 接近 c 时，质量将变得非常之大，以至于没有能量可以使它达到光速。任何有质量的物体或粒子都不可能被加速到光速。即使是前面章节讲到过的巨型加速器也不可能迫使一个具有微小质量的粒子例如电子或质子达到光的速度，更不用说超过这个速度了。

虽然有些人很难相信时间膨胀、长度收缩以及“相对论质量”，大量的实验证据却支持狭义相对论。前面章节提到过的加速器中的粒子常常能达到接近光速的速度，这时，可以检测到相对论效应。这些粒子的行为总是能和理论预测保持一致。

时间膨胀同样是一个可测量的效应。我们可以有另一种表达时间膨胀的方式，那就是：当时钟处于运动状态时它走得更慢。也就是说，它比一面静止的时钟走得慢。

时间膨胀看起来好像并不发生在人们通常遇到的速度上。事实上这种效应是发生了的，只是因为太小，所以几乎不可能观察到。考虑一下闪电和火车的例子，v 为 50 英里/小时(80 k 千米/小时)，也就是 0.013 9 英里/秒(0.022 2 千米/秒)。把这个速度和光速 c=186 200 英里/秒(30 万千米/秒)代入方程，分母为$\sqrt{[1-(0.0139)^2/(186200)^2]}=\sqrt{(1-5.6\times10^{-15})}=0.999999999997$。时间间隔确实是不同的，但只相差大约万亿分之几。1 分钟的间隔只会相差小得无法检测到的一点点。

再假定 v=93 100 英里/秒(15 万千米/秒)，这个速度是真空中光速的一半。将其代入方程后分母为$\sqrt{[1-(93100)^2/(186200)^2]}=\sqrt{(1-0.25)}=0.866$。一个以速度 v=9.31 万英里/秒(15 万千米/秒)运动的观察者的一分钟间隔相对于一个静止的观察者来说要长出超过 9 秒钟(60 秒/0.866=69.3 秒)。

描述长度收缩的方程是类似的。以速度 v 运动的观察者测得的一段长度 L' 相当于静止观察者测得的由以下方程式给出的一段长度 L：

$$L=L'\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

代入一些数字表明，除非速度快到一个与 c 具有可比性的相当高的程度，否则长度收缩也是不可觉察的。

时间膨胀影响几乎所有的过程，从时钟的嘀嗒计时到人的衰老。一个高速运动的人比一个静止的人老得更慢，虽然这个效应没有被直接观察到，因为没有什么机器可以使人以一个与光速具有可比性的速度运动起来，但在一个叫做 μ 介子的粒子身上却发现了类似的效应。这种粒子不太稳定，寿命很短，很快就发生衰变。CERN 的研究者使用加速器给了 μ 介子一个非常接近光速的速度，结果发现这些粒子的平均寿命比静止状态大约长了 30 倍。在与此相同的情形下，如果由静止的观察者来测量的话，人类的平均预期寿命将超过 2 000 岁。

双生子悖论

尽管相对论时间膨胀是对的，但这并不是说时间对于那些高速运动的人来说变慢了。

人们有时错误地把发生在运动参考系里的活动想象为“慢动作”。实际上，只有对运动参考系的人进行观察的静止观察者才会察觉到时间的变慢。对于运动着的人来说，一切都似乎是正常的，包括时间。相对性原理要求情况是这样的，否则物理规律在不同的参考系里就是不一样的。狭义相对论的效应只在相对运动中发生，而不是发生在单一的参考系里面。

然而，在狭义相对论中有一种情形似乎是一个悖论，即不可能为真的矛盾。假想一下，宇航员阿尔伯特登上以接近光速的速度运行的火箭开始一次太空旅行（虽然今天的火箭还达不到这个速度，但我们没有理由不相信人类最终能够建造出这样的火箭）。阿尔伯特的双胞胎兄弟巴尔伯特则留在了地球上。根据狭义相对论，阿尔伯特将比巴尔伯特老得更慢，所以当他回到地球的时候，他将比他的双胞胎兄弟更年轻。

阿尔伯特将比他兄弟年轻这样一个事实有时被认为是一个悖论，但在这里并不是。由于时间膨胀，阿尔伯特乘坐的宇宙飞船里的时钟包括他本人的生物钟要比巴尔伯特的走得慢。所以当他回到地球的时候，他将比他的兄弟更年轻。

悖论在于运动是相对的。我们不可能在匀速运动的参考系之间作出区分，这就是相对性原理。坐在一列以恒定的 50 英里/小时（80 千米/小时）的速度行驶的火车上的观察者，观看到窗外的风景在以同样的速度经过窗户。对于火车上的观察者来说，有一棵树似乎以恒定的 50 英里/小时（80 千米/小时）的速度匆匆掠过。虽然人们知道火车在动而树没动，但就物理学所关心的而言，这两种情况是没有什么区别的。如果因为某种原因，一个人上了火车，然后窗外的风景开始匀速运动——在游乐园也许可以发生这种情况，没有什么实验可以让火车上的观察者证实是风景在动而不是火车在动。物理规律在这两种情况下都将是一样的。

在阿尔伯特看来，他自己在以接近光速的速度运动。但假想一下，巴尔伯特说他才是真正在运动的，而不是阿尔伯特，他用相对性原理来辩护自己的观点。事实上，巴尔伯特完全有权利宣称他自己是运动的而他的兄弟阿尔伯特是静止的。不可否认，在这两兄弟之间存在着运动，但到底是谁在动则取决于谁的观点被采纳。既然巴尔伯特有权利宣称他才是运动着的，那么他的时钟就应该比阿尔伯特的走得更慢。这样，当阿尔伯特回到地球上时，巴尔伯特就应该比他的兄弟更年轻。但阿尔伯特却认为他将比巴尔伯特更年轻。这就是著名的双生子悖论，很显然，不可能他们两个都是对的。

如果一个理论的预测产生出了悖论，这个理论就肯定包含了瑕疵。然而，狭义相对论并没有制造悖论，瑕疵出在巴尔伯特的观点中。当阿尔伯特开始他的旅行时，他和他的兄弟巴尔伯特处于相同的参考系中，但阿尔伯特需要威力强大的火箭来给他加速，使他达到一定的速度。加速就是速度的变化。当相对运动的速度恒定时，观察者

无法确定谁在运动而谁不在运动，但如果发生了速度的改变，他们就能很明确地区分不同的参考系。坐在加速的火箭或者其他加速的交通工具上的观察者会感觉到座位似乎在挤压他们的后背。阿尔伯特体验到了这种过程，所以是他的速度变大了。狭义相对论在速度变化时是无效的，但这一理论对巴尔伯特仍然适用，他将观察到阿尔伯特的时钟走得更慢。当阿尔伯特回来时，他将比他的兄弟巴尔伯特年轻。

当火车加速时，坐在火车上的观察者能感觉到背部的推力，这个效应同样使得前面提到的火车实验失效了。一个观察者登上火车之后看到窗外的景物开始运动，他能马上知道有什么不对劲，因为没有加速过程——背部感觉不到推力。一旦火车匀速行驶，观察者就没有办法区分到底是火车还是景物在动了，但如果参考系在减速或者加速，那就很容易区分。

引力和广义相对论

爱因斯坦注意到了加速的问题，于是尝试着把狭义相对论推广到更一般的情形，包括变速运动。虽然这种尝试并不成功，但爱因斯坦却发现了另一个原理，即等效原理，这个原理把加速度和引力联系起来了。等效原理最简单的形式就是声称匀加速过程——速度改变的速率恒定，与万有引力的作用没有什么区别。爱因斯坦通过这个原理将相对论扩展到更一般的情形，于是就有了广义相对论，这个理论同时也是今天物理学家所能有的对引力的最好解释，所以它也是一种引力理论。

前面提到过，在匀速行驶的火车上的观察者没有实验可以用来证实到底是火车在动还是景物在动，并没有什么物理规律说是在火车动时和风景动时有所不同，所以就没有实验可以告诉观察者到底是什么在动。然而，如果存在加速过程，就不会出现这种情况了，因为速度的改变是可以检测得到的。

现在设想一下另外一种不同于火车的情景。假设观察者爱丽丝站在一个像升降机一样的没有窗户的盒子里，她一开始对盒子的位置一无所知，盒子有可能在任何地方，在太空中或者在一个星球上。为了搜集线索，爱丽丝进行了一些观察并做了几个实验。

爱丽丝注意到她是有重量的——她必须使用腿部肌肉才能避免倒下去。当她掏出一枚硬币并松开手，结果硬币落到了地板上。在硬币下落的时候测量它的速度，爱丽丝发现它在以恒定的速率加速，加速度为 32 英尺/秒^2(9.8 米/秒^2)。换句话说，硬币下落的每一秒钟它的速度都恒定地增加 32 英尺/秒(9.8 米/秒)。一秒钟之后硬币的速度为 32 英尺/秒(9.8 米/秒)，两秒钟之后它的速度为 64 英尺/秒(19.6 米/秒)。

尽管爱丽丝看不到外面，没有任何有关盒子位置的其他线索，但根据实验的结果，她得出了她位于地球表面的结论。她认为自己有重量是因为重力的作用，而硬币的表现和它在地球表面坠落时完全一样，也就是以 32 英尺/秒^2(9.8 米/秒^2)的加速度做加速运动。

尽管爱丽丝的观察是有效的而且也是很聪明的，但爱因斯坦意识到她的结论有可能是错的。假想一下盒子不在地球表面，而是位于太空中而且以 32 英尺/秒^2(9.8 米/秒^2)的加速度做加速运动。正如火车上的观察者所注意到的那样，加速过程感觉起来就像一阵推力。这跟具有重量的效果是一样的，因为如果盒子在向上加速，爱丽丝将会感觉到来自地板的推力，而这种感觉和"重量"的感觉是完全一样的。宇航员在火箭发射的极端加速过程中就能体验到这种效应，他们干脆就用重力来描述这些加速过程——1"G"，或者 1 重力加速度，等于 32 英尺/秒^2(9.8 米/秒^2)。

硬币的加速运动可以有另外的解释，例如可以是盒子在以 32 英尺/秒^2(9.8 米/秒^2)的加速度做加速运动。这个加速度是 1G。我们可以试着考虑一下盒子的运动。当爱丽丝释放硬币的时候，硬币的初始速度和爱丽丝以及盒子的其他部分的速度是一样的。盒子继续以 32 英尺/秒^2(9.8 米/秒^2)的速率增加速度，但这时硬币已经不能感觉到推力了，因为它没有再和盒子或者盒子里的其他东西保持接触。硬币继续以它的初始速度做自由运动。最后，由于盒子的速度在增加，它的地板接触到或者贴到了硬币上。看起来似乎是硬币以 32 英尺/秒^2(9.8 米/秒^2)的加速度"落"到了地板上，但实际上却是盒子在加速。

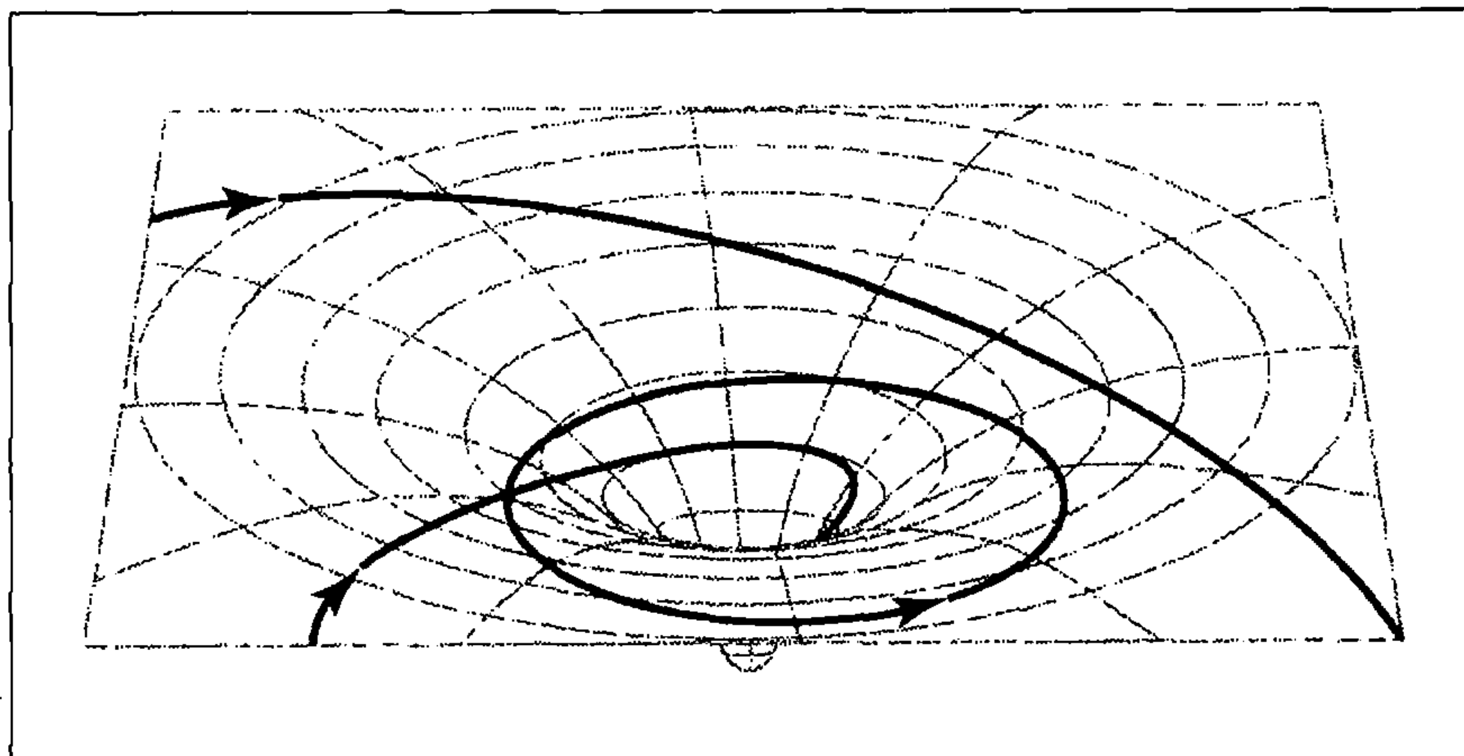
等效原理声称没有任何实验可以让爱丽丝确定自己是在接受重力的作用还是在体验一个匀加速过程。物理规律在这两种情况下都是一样的。科学规律不依赖于观察者的位置或运动这样一个结论是狭义相对论和广义相对论共同的基础。

爱因斯坦还意识到等效原理隐含着引力和质量的某些信息。如果一个观察者根本就区分不了由引力造成的重量和由加速造成的推力，那么在这两种情形中的质量应该是完全相同的。牛顿在大约 300 年前提出了一种理论把加速度和推或拉等力的概念联系了起来，他说力导致物体的加速运动而加速度则跟物体的质量有关。牛顿的另一个伟大成就是发现了万有引力的公式，公式中也包含了物体的质量。加速度和引力都涉及质量，如果等效原理正确的话，物体质量的值在这两种情形下应该是相等的。测量表明确实是这样。

牛顿的运动和引力方程是有效的，至少对于远远小于光速的速度来说是这样的，但有关力的观念却让爱因斯坦很头疼。在牛顿看来，有质量的物体彼此施加一种相互吸引的万有引力，物体之间甚至可以相隔很远。爱因斯坦不明白为什么物体能够穿越空间来施加作用力。前一章介绍的粒子物理学的标准模型把力看成是在力的传递粒子的交换过程中产生的一种东西，但在爱因斯坦思考力的本质的 20 世纪初期，这种理

论尚未被发展出来(而且爱因斯坦是否会喜欢这个理论还是个问题)。

爱因斯坦用几何学而不是用力的概念来进行他的思考。既然加速运动和引力是无法区分的,那么一个物体对另一个物体的引力吸引就和落向或者滚向它的运动是等效的。爱因斯坦把引力看作是时空本身的扭曲,即它在几何上的弯曲。大质量的物体例如太阳使空间发生弯曲,而像行星这样的其他物体就会顺着这些弯曲运动。物理学家有时把时空比喻成一张橡胶垫,躺在垫子上的大质量物体形成凹陷而使橡胶垫发生弯曲,如图所示。当其他物体靠近时,它们就会落向大质量的那个物体。



此图将大质量的物体描绘成一张橡胶垫上的陡峭的凹陷或深谷。橡胶垫代表着时空,深谷的弯曲代表引力。其他的物体滚向深谷——这就是那个大质量物体吸引其他物体的几何表示或模型。

爱因斯坦在 1915 年提出了广义相对论。到这个时候,他早已不是那个不为人知的专利局职员了,而是一位受人称赞的物理学家,他在 1905 年发表的论文已经使他名声在外。爱因斯坦于 1921 年获得了诺贝尔物理学奖。

物理学家在接受爱因斯坦的理论之前需要对它进行检验。前面已经提到过对引力和加速作用下质量等效的检验,但广义相对论还作出了其他一些关键的预测。爱因斯坦通过使用与狭义相对论相似的推理过程得到了广义相对论的方程式,只不过在广义相对论中,他考虑了如爱丽丝面对的那些情形,他想知道,如果从等效原理出发,会得到什么结果。广义相对论修改了牛顿的那些公式,但和狭义相对论一样,在很多情形下,新公式都还原成了旧公式。不过,物理学家还是可以检验出两者的差别。

广义相对论的预测之一很快就得到了证实。早在 19 世纪人们就知道,水星的轨道在近日点(离太阳最近的那一点)有一个微小但却可以观察到的移位,也就是说近日

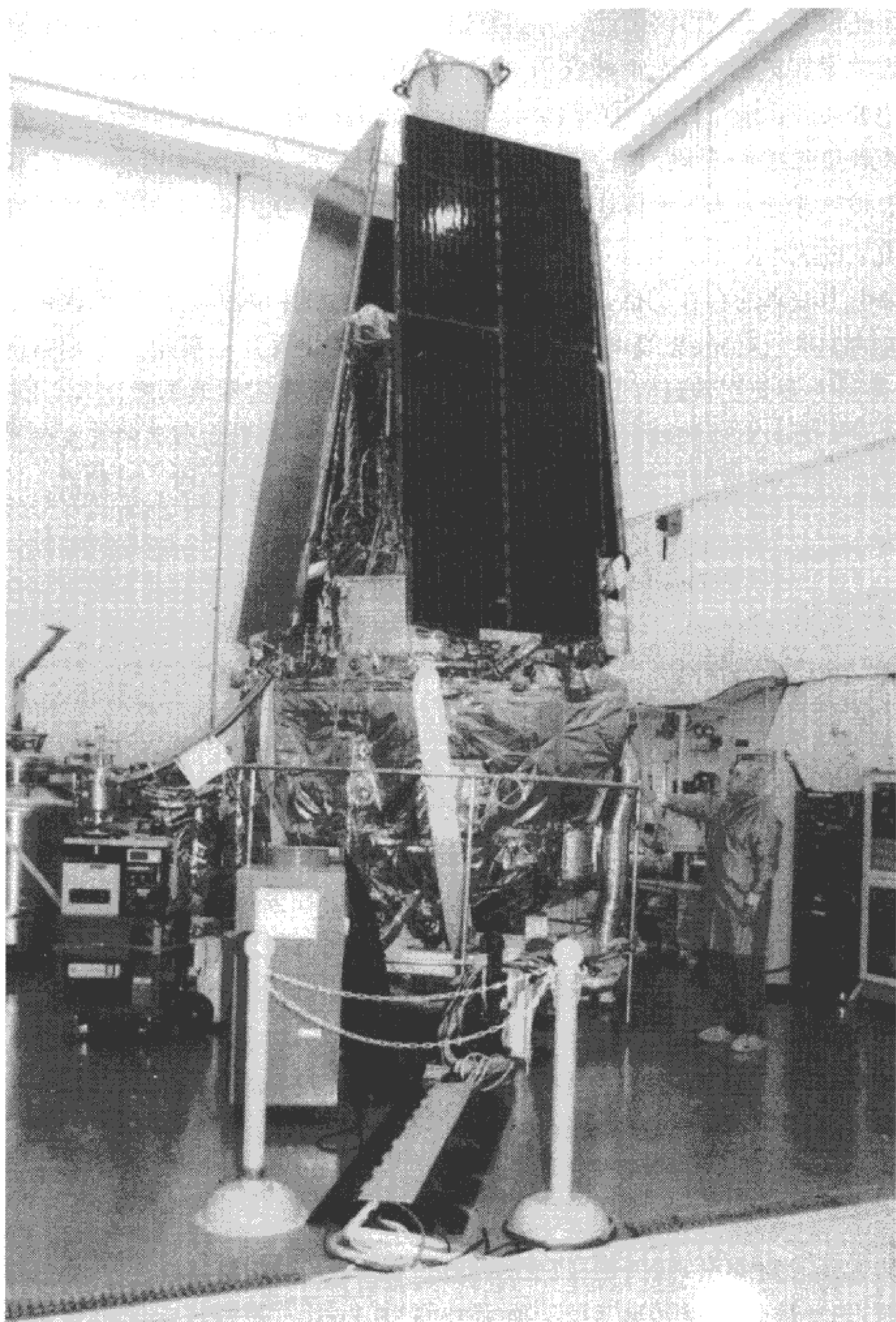
点每年都改变一点点。来自其他行星的引力作用可以解释一部分位移，但不能解释它的全部。广义相对论的方程式非常成功地解释了其余的位移部分，从而解开了天文学上长期悬而未决的一个谜题。

广义相对论还预测了引力作用引起的光的弯曲。基于牛顿观点的旧的引力理论也预测了这种现象，但广义相对论预测光弯曲的程度要比旧理论的预测大出两倍，这是由时空的弯曲造成的。大质量的物体会扭曲它们周围的空间，包括光束在内的所有物体的轨道都被弯曲了。这个效应已经通过多种方法得到了证实，其中一种方法是测量星体发出的光经过太阳附近时星体位置的改变。太阳的存在使得星体发出的光发生偏转，从而我们观察到星体位置的改变。得到的结果和广义相对论非常吻合。

广义相对论的另一个预测和狭义相对论的时间膨胀效应非常相似，却显得更为有趣。狭义相对论正确地预测了由运动引起的时间变慢，而广义相对论则预测时间也会由于引力的存在而变慢。和狭义相对论的预测一样，这个预测也得到了确证。在1976年进行的一次名为"引力探测 A"(Gravity Probe A)的非常灵敏的实验中，火箭将一座高度精准的时钟带到了 6 200 英里(1 万千米)的高空。在这个高度，因为引力的作用不如地球表面强，所以这座时钟应该要比地球表面的时钟走得快一点。虽然这个效应很细微，每分钟仅相差十亿分之几秒钟，但实验结果确实支持了这个预测。

在 2004 年开始的另一次更为精准的名为"引力探测 B"(Gravity Probe B)的实验中，一颗小卫星被送入了轨道。这次探测将测量地球引力对空间和时间的作用。目前结果还没有出来，但物理学家预计在几年之内会有一个答案。与此同时，广义和狭义相对论对其他一些卫星来说也是很重要的，例如负责为全球定位系统(GPS)提供信号的那些卫星。全球定位系统可以为航行者提供非常精确的位置信息，例如，一艘船的船长只要配备一个 GPS 接收器便可以知道船在海洋中的精确位置，有些情况下误差竟不超过 10 英尺(3 米)。GPS 的工作原理是：在轨道上运行的卫星发射出包含信号发射时间和它们自身的位置等信息的信号。GPS 接收器检测到这些信号并利用它们来计算出自己所在的位置。GPS 的高度精确性首先要求有相当精准的卫星信号，如果高速运动的高高在上的卫星不把相对论考虑进来的话，是不可能做到这一点的。

广义相对论是一个复杂的理论。这个理论关于存在引力波的预测还有待验证。引力波类似于光的电磁波。根据广义相对论，围绕大星体运转的物体等会发射出这些引力波，也叫做引力"辐射"。注意不要把引力波和上一章粒子物理学理论所预测的尚未被发现的引力子混淆了。如果两者都存在的话，它们应该是同一种现象的两种不同的实现，就像光的粒子光子和电磁波都是光的实现一样。



图中显示的是位于加利福尼亚州范登堡空军基地的“引力探测 B”。它由NASA、斯坦福大学和洛克希德-马丁公司联合开发，其使命是检验爱因斯坦的广义相对论。(NASA-KSC)

目前还没有人检测到引力波，可能是因为它的强度太弱，正如理论所预测的那样。由众多科学家实施的“激光干涉仪引力波观测台”(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，LIGO)项目使用干涉仪作为探测器。前面介绍过，干涉仪利用波的干涉现象来检测变化。引力波的通过将扭曲长度，它们起伏前进，压缩和伸展着时空。困难就在于如何检测到这些波纹，物理学家预计在大多数情况下其尺寸不会超过一个质子的大小。

如果引力波真的存在的话，它对天文学家将非常重要，因为它为他们提供了又一种研究宇宙的工具。对光、无线电波和X射线等电磁波的研究一直是一个丰富的信息来源，但如果引力波天文学诞生了，我们就有可能获得有关宇宙性质的激动人心的新线索。许多人都期待着引力波能够被发现，毕竟广义相对论的一些最为著名的天文学预测都已得到了证实，至少已经被广为接受。这些现象之一便是奇怪的天体——黑洞。

黑洞

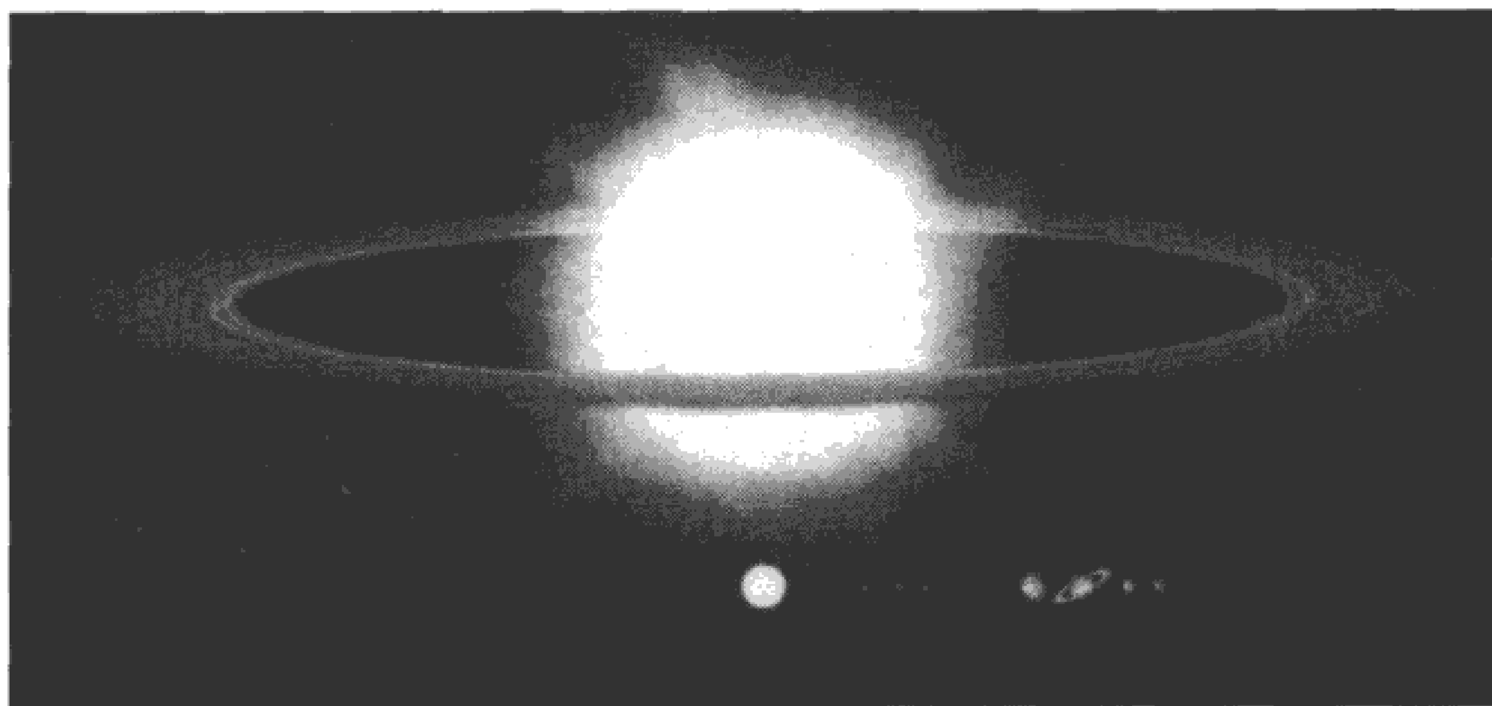
黑洞是一个高度致密的天体，在极小的体积内聚集了极大的质量。这样大的密度产生出非常强的引力，使得任何物体甚至包括光都无法逃离(基于第2章所讲的量子力学现象，这个规则有一些很不寻常的例外)。黑“洞”并不是空间中的一个洞，而是一个区域，在这个区域里，引力吸进物质，这些物质从此再也看不见了。

广义相对论的方程式涉及到张量，张量是一种远比普通数字复杂的数学概念。广义相对论的数学原理非常艰深，很少有人能掌握。但在爱因斯坦1915年发展出广义相对论的主要思想后不久，德国物理学家卡尔·史瓦西(Karl Schwarzschild，1873—1916)就找到了方程的一个解，描述了一个黑洞，但“黑洞”这个术语直到20世纪60年代才出现。

当一个老了的质量大的星体发生坍塌时，就有可能形成黑洞。星体是一个主要由氢和氦组成的巨大的气体球，内部的核聚变反应使其发光，这在第1章讲过。巨大质量产生的引力作用将组成星体的物质往里拉，就像地球表面的物体由于重力而下落一样。与这个向内的拉力相抗衡的是由核反应释放能量造成的向外的压力。在星体生命周期的大部分时间里，向内的和向外的力相互平衡，星体也就维持了一个稳定的半径。然而，当星体将要耗尽聚变反应所需的原料时，引力的内拉力便超过了向外的压力，于是星体坍塌了。

对于像太阳这样的小星体，因为没有足量的物质，所以在它生命晚期发生的坍塌

并不会产生黑洞。只有当星体拥有足够的质量以至于它的粒子无法承受巨大的引力吸引时，才会形成黑洞。质量比太阳大 10 倍的星体就有可能发生这一过程(像太阳这样的比较小的星体也拥有更长的寿命，一般达数十亿年。太阳在耗尽它的核燃料之前还能维持几十亿年)。质量大的星体发生坍塌时就把它的物质压缩成一个黑洞，至少在理论上是这样的。



图中的这颗巨星很有可能会最终成为一个黑洞。这颗星的下方是太阳系的示意图。我们可以看到，这颗巨星的半径远远越过了地球的轨道。(NASA/JPL-Caltech)

黑洞的外部边界叫做视界。一旦有物体越过了这个“界线”，它便不能逃脱。相对于它所包含的质量来说，黑洞的界线或者直径之小是令人难以置信的。一个质量是太阳 10 倍的黑洞其直径只有大约 37 英里(59 千米)。而太阳只有这个质量的 1/10，其直径却是 87.5 万英里(140 万千米)。

没有谁知道黑洞内部的物质是什么样子的。黑洞中心是一个叫做奇点的区域，在这里物质的密度没有办法用数字来形容，因为根据方程式，它是无穷大的。然而，黑洞的质量仍然在施加引力吸引，引力是这些天体维持自身的手段。

黑洞强大的引力能把附近的任何粒子吸附过来。这个强大的作用力以一个比地球重力大得多的速率给粒子加速，这些物质发生碰撞并变热。落到黑洞里的物质一般都有足够的能量，能产生高频的电磁辐射，叫做 X 射线。正如广义相对论所预测的那样，强大的引力场的另一个效果就是使光发生显著的弯曲。从更远处的星体发出的光穿越这个区域时要发生弯曲，弯曲足够大便产生了透镜效应。弯曲的结果是远处星体的像和位置就被扭曲了。天文学家已经发现了数百颗有可能是黑洞的天体，其中有一

些可能性还非常大。银河系是太阳及其太阳系所在的星系，在银河系的中央似乎就存在质量超过太阳的 100 万倍的一个黑洞。许多人都想知道对黑洞内部进行探索将会是什么样子——结果将是非常不幸的，勇敢的探索者不光回不来，强大的引力还会把他们杀死。黑洞的引力是致命的，因为它的强度随着距离变化，而这会导致探索者身体的过度拉伸。实际上，地球的引力也以相同的速率变化，但因为地球的引力远没有黑洞的大，所以这不成为一个问题。在黑洞的奇点附近，因为引力非常强大，所以在很小的距离上，引力强度的改变就是相当显著的。施加在探索者身体一端的引力将会远远大于施加于另一端的，结果身体被拉伸了——这真是一种悲惨的死法。



图中的粒子流来自在 M87 星系中央的巨大黑洞周围打转的极度高温的物质。这个黑洞的质量是太阳质量的数十亿倍。(NASA/STScl/AURA)

广义相对论的数学丰富性使得其他和黑洞一样奇怪甚至比黑洞更奇怪的物体的存在成为一种可能。蛀洞是一种连接两个时空区域的通道，在某些情况下，这两个区域在空间或时间尺度上还有可能相隔非常远。有些人已经尝试着把蛀洞和黑洞内部联系起来。虽然这样的想法激发了一小部分科学家的想象力，启发了更多的作家的灵感，目前却还没有证据表明这些事物的存在。

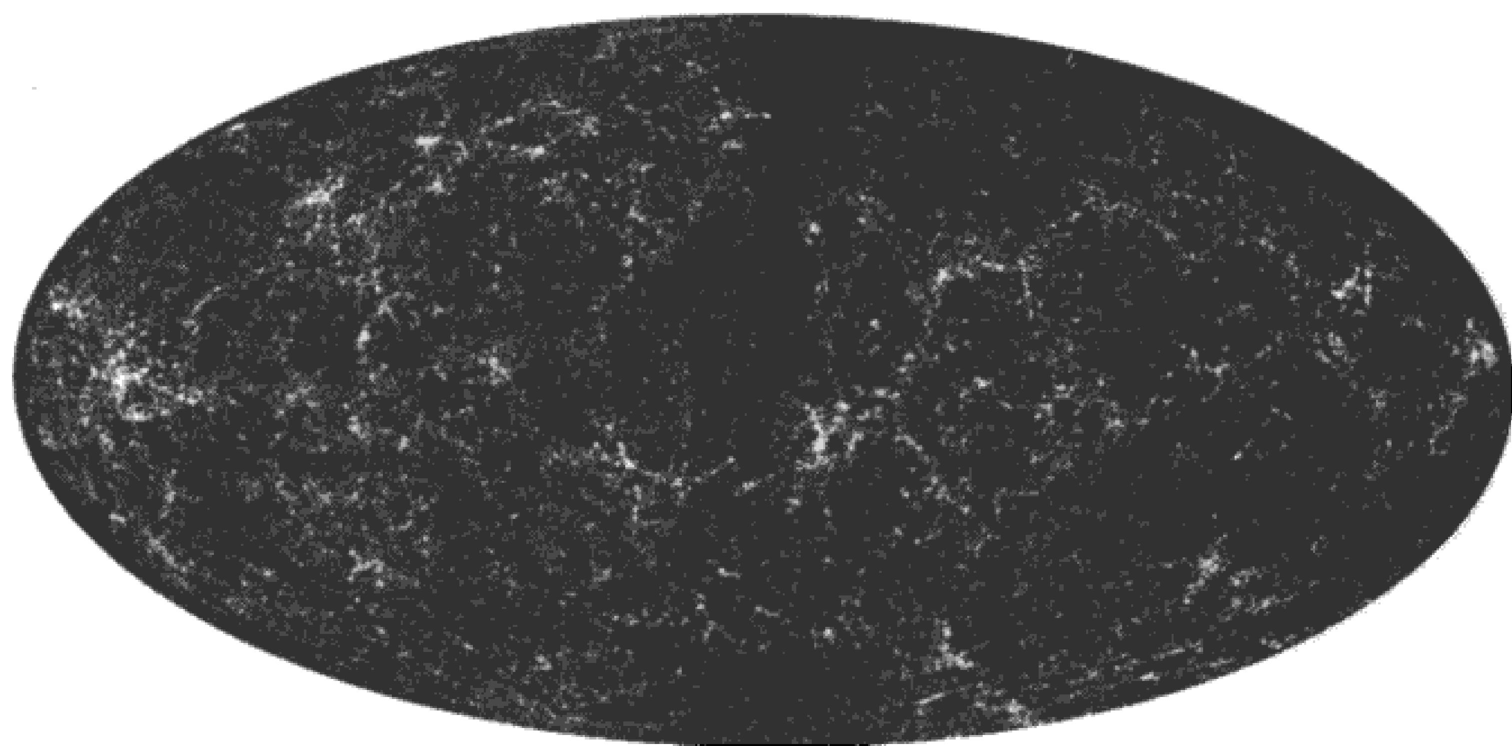
即使永远找不到蛀洞，相对论也已经对物理学产生了巨大的影响。不管是狭义还是广义相对论，它们都修改了长久以来的一些观念和公式并改变了人们认识空间和宇宙的方式。物理学家们还在继续探索广义相对论的数学复杂性，一方面是因为它实在太丰富了，另一方面则是因为它仍是目前所有的最好的引力理论。

尽管引力在前一章讨论过的粒子物理学中并不重要，它在宇宙中的大距离上却起着极其重要的作用。正因为这一点，对于研究宇宙的物理学家和天文学家来说，广义相对论是必不可少的。广义相对论和天文学的关系很早就已经很明显了，那时爱因斯坦就已发现他的方程式表明宇宙的尺寸在增大。爱因斯坦认为这样的膨胀是不太可能的，甚至有点荒唐，于是他对方程做了修改，这样一来，就不会再出现这种结果了。爱因斯坦的修改后来被证明是错的，在下一章我们将看到，广义相对论为我们提供的有关宇宙的见解比他的发现者愿意相信的还要多。

5
宇宙学

在17世纪牛顿发现将物体的运动和它所受到的力联系起来的方程式之后，人们对这个世界的理解比以往任何一个时候都要深刻。物理学家能够计算并预测各种情形下物体的行为，不管它们是在运动还是处于静止。牛顿的引力理论延伸了科学的边界使之扩展到整个太阳系及其之外的宇宙空间，解释了行星的轨道问题并使之能得到非常精确的计算。万物似乎都遵守这些物理规律，于是人们把宇宙想象成一个巨大但简单的机械装置，永不停息地运转而且永不改变。

大部分人都认为这个静止(不变)的宇宙在广度上是无边无际的——它没有边界。但德国科学家和医生亨利希·奥伯斯(Heinrich Olbers，1758—1840)却对此感到有点困惑。如果宇宙是无穷的并布满了星体，那么根据天文观察，宇宙中星体的数量应该是无穷大的。这样，天空中每一个点都必定有一个星体。如果真是这样的话，晚上的



在这张整个星空的图景中有超过100万个星系。(NASA-JPL)

天空就不应该是黑暗的。对于一个无限的宇宙来说,黑暗的天空是不可能出现的,这是一个矛盾,它被叫做奥伯斯悖论。

虽然奥伯斯悖论对一个无限的宇宙提出了质疑,但宇宙有限(有边界)的观点同样会有一些麻烦的问题。如果宇宙并不是无限的,那么是一堵什么样的墙或者边界把它终结了? 在墙的另一边又会有些什么? 要回答这些问题并不容易。爱因斯坦在 20 世纪初期提出的广义相对论为我们认识宇宙提供了一条有价值的线索,从此,物理学家开始考虑一个弯曲的时空。然后,美国天文学家爱德温·哈勃(Edwin Hubble,1889—1953)为我们展示了一个并不静止的宇宙。

宇宙大爆炸

前一章提到过,广义相对论的发现者阿尔伯特·爱因斯坦意识到他的方程式似乎表明宇宙正在膨胀。爱因斯坦起初不愿意接受这一点,于是他在方程中引入了一个“宇宙常数”,这样一来,他的理论就只描述了一个静态的宇宙。宇宙学(cosmology)指的是对宇宙的研究,这个术语来源于希腊词语 kosmos,意为“秩序”或“宇宙”。

虽然爱因斯坦是一位伟大的物理学家,有很多科学家却并不认为爱因斯坦所做的修改是必要的,甚至怀疑其有效性。在广义相对论的复杂的方程式的基础上,比利时科学家乔治·勒梅特(Georges Lemaitre)和俄国数学家亚历山大·弗里德曼(Alexander Friedmann)表明,有关宇宙膨胀的预测才是对的。勒梅特后来提出一种理论,认为宇宙在过去曾经是很小的,经过很长一段时间的膨胀才发展到今天的规模。当时几乎没有人相信这些观点,甚至对其不屑一顾,直到哈勃和其他天文学家发现了一些支持宇宙膨胀观点的实验性证据。

哈勃在 1929 年发现宇宙中的星系似乎在朝各个方向离地球而去。星系是星体和尘埃的巨大集合,例如银河系包含了太阳系以及大约 3 000 亿颗其他的星体。宇宙中包含大量各种形状、各种大小的星系,哈勃发现这些星系都在做远离地球的运动,离去的速度跟它们离我们的距离有关——最远的星系离去得更快(但一些离我们较近的星系却在向地球靠近而不是远离,这是由银河系和这些星系之间的引力吸引造成的)。爱因斯坦后来承认他的修改是一个错误。

我们无法直接测量星系的退行运动。最近的星系离地球也有 147 000 万亿英里(236 000 万亿千米),实际上大部分星系要比这个距离远得多。哈勃只能通过研究来自星系的光线来确定它的速度,除此之外没有其他办法。天文学家使用大型的望远镜

来研究星体,这些望远镜能搜集和聚焦从遥远星体和星系一路走来的微量光线。这些光可以分解为它的频谱,或者说频率成分,正是这些成分构成了白光的"颜色",牛顿就曾经使用棱镜来展示光是由彩虹的各种颜色组成的。

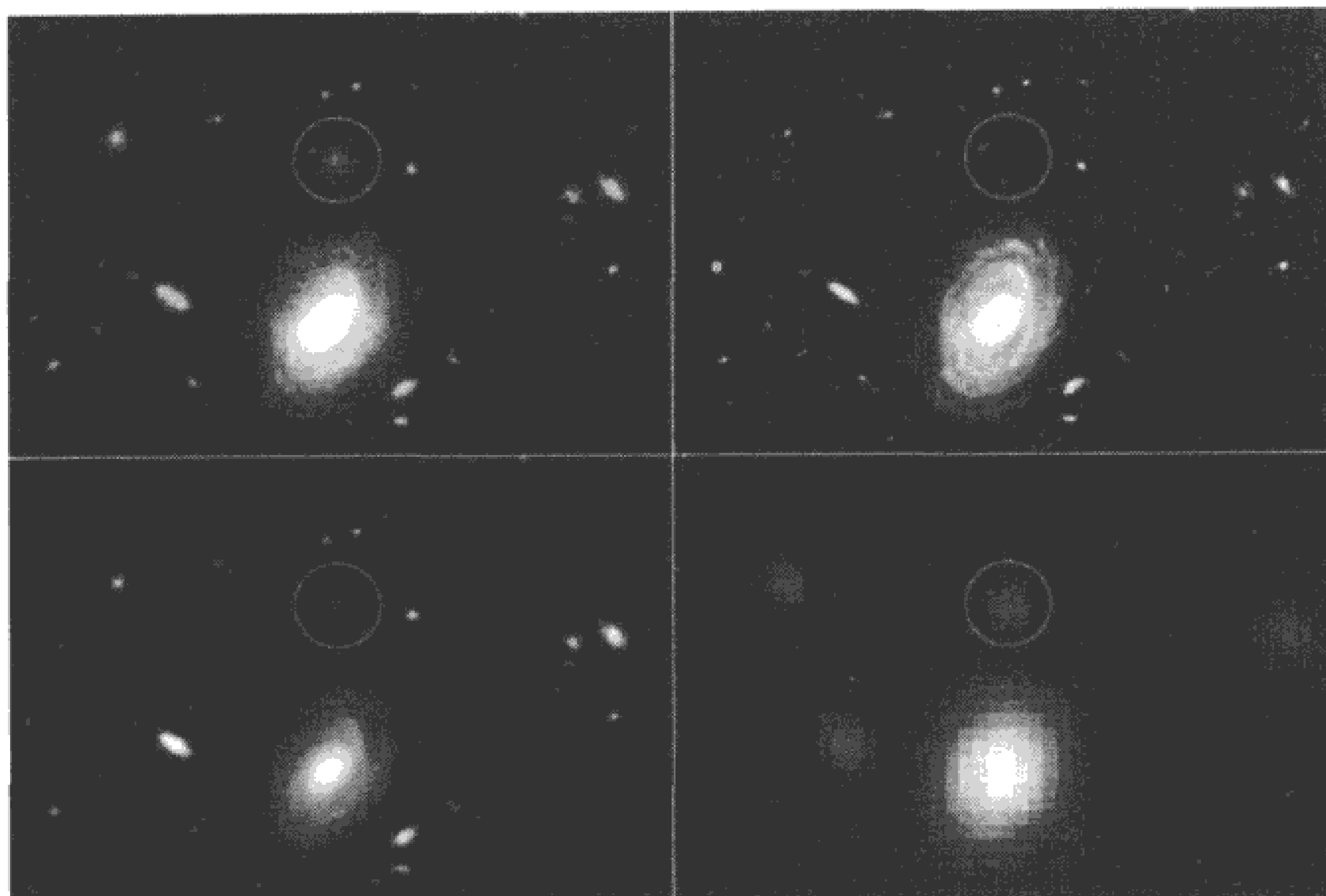
哈勃之所以能够通过星系的光谱来测量它的速度,要归功于奥地利物理学家克里斯琴·多普勒(Christian Doppler,1803—1953)发现的一种波的现象,即多普勒效应。多普勒效应是由波源和接收者的相对运动引起的波的频率变化。波源发射出一列波,例如声波,如果波源和接收者之间发生了运动——例如,急速行驶的救护车的警报发出很响的噪音,站在人行道上的一位行人听到了这个声音——这位行人测量到的声音频率和警报发出的频率是不一样的。当波源和接收者靠近时,波的频率增加——波峰变得更为集中,而在相反的情况下,波峰之间的距离增大,波的频率降低。这个效应解释了为什么当救护车靠近人行道上的行人时,他所听到的警报的音调(频率)升高,而当救护车离去时,警报的音调降低。

多普勒效应不仅发生在声波上,在光波上也会发生,在星体或星系的光谱上发现的暗线使得多普勒效应对天文学非常重要。19 世纪初期,德国科学家约瑟夫·冯·弗朗霍夫(Joseph von Fraunhofer)在太阳光中发现了这些暗线,开启了对它们的研究。这些暗线的产生是由于原子吸收了光线中某些特定的频率,原子例如氢原子只吸收特定频率的光,这与它们的发射频率有关,这在第 2 章中讲过。在星体的外层空间或者星系周围,光线通路上的原子吸收跟它们有关的特定频率的光,这就导致了这些频率成分的缺失,使其不如其他成分明亮,从而在光谱中形成吸收频带或暗线。每种原子的吸收和发射光谱是已知的,但光源(星体和星系)和接收者(天文学家和他们的望远镜)之间的相对运动改变了这些频率。这就是多普勒效应。

我们可以用星系光谱的吸收线和发射线的频移量来度量这个星系和地球之间相对运动的速度。哈勃发现所有遥远星系光谱的暗线在频率上都要低得多,表明这些星系在远离而去。这种向下的频移是移向光谱的红的一端的,也就是最低的频率,所以这种现象被叫做红移。越远的星系红移越大,表明它们离去的速度也越大。

宇宙的膨胀意味着勒梅特的观点是有价值的。由于某种原因,曾经有过一次爆炸,在哈勃所做的一些工作以及其他天文学家和物理学家的观察基础上得到的证据表明,这次爆炸发生在大约 140 亿年前。这就是宇宙的起源——宇宙大爆炸。

宇宙膨胀的不少方面起初看起来都很令人迷惑。许多物理学家都更喜欢把宇宙的这一变化想象成空间在膨胀而不是星系在运动,从这个角度来看,并不是星系在急速地离开地球,它们只是被膨胀的空间搬动着,至少在目前的情势下,空间的膨胀胜过



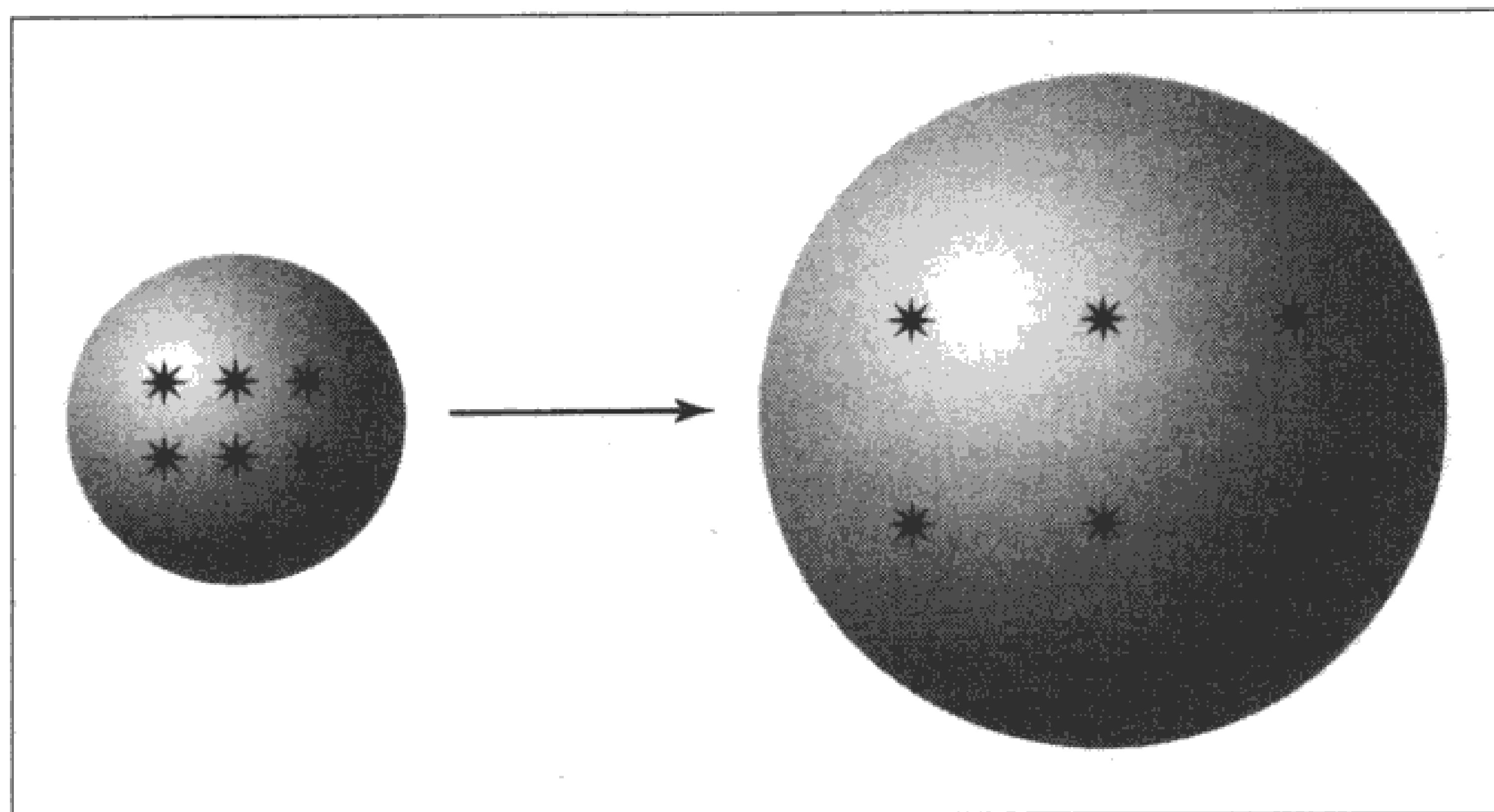
这 4 幅图像显示了在宇宙历史上很早形成的一个遥远的星系。尘埃使其可见光的影像非常模糊(右上),但在不同波长的红外图像中它却显现出来了(左上、左下以及右下)。(NASA-JPL)

了相隔遥远的物质之间微弱的引力吸引。另外我们要明白的重要一点是,星系远离地球而去并不意味着地球就是宇宙的中心。事实上,宇宙中几乎所有的事物都在彼此远离而去,就像下页图中膨胀的气球上所画的那些点那样。宇宙的膨胀是没有中心的。在地球上的天文学家看来,所有的星系(除了一些离我们最近的)都在远离地球,然而,宇宙中任何其他星球上的天文学家都可以做出与此类似的论断。

今天,宇宙大爆炸理论已经得到了广泛地接受,但红移只是其部分证据。这个理论的细节是非常复杂的,在这里就不再讨论了。大爆炸理论正确地预测了宇宙中氢和氦的数量。另一个非常重要的证据就是爆炸的残余物——宇宙背景辐射的发现。

宇宙背景辐射是来自空中各个方向的电磁辐射,这就是为什么它被称为“背景”——它似乎是天空背景的一部分。阿尔诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)这两位科学家在 1964 年意外地发现了这种辐射。被顽固的特定频率的噪音惹火了的彭齐亚斯和威尔逊发现它们竟然充满了整个空间。

宇宙背景辐射的性质和大爆炸理论是一致的。例如,宇宙背景辐射的温度——也就是宇宙空间的温度——是-454.8 ℉(-270.4℃),相当于 2.7K,这仅比可能的最低温度高了几度而已。最近使用卫星对这些辐射进行了更加详细的勘察,更为精确的



随着气球膨胀，画在气球表面上的那些点之间的距离也在增大。从其中任何一个点来看，其他的点都在离这个点而去。

测量进一步支持了大爆炸理论(要注意的是，虽然宇宙空间的温度听起来有点古怪，但就像太阳的辐射能够温暖地球上的物体一样，宇宙辐射也是能量，所以也可以温暖物体。如果把温度计等物体放置在远离其他热量或辐射的宇宙空间中，这个物体的温度最终会变得和“宇宙空间的温度”一样)。

宇宙在诞生之前是什么样子的，甚至这个问题本身是否有任何意义，现在都还不能回答。很多人认为大爆炸是时间的开始，所以在此之前什么都不可能发生。这听起来太奇怪了，简直不敢相信，但也许仅仅是因为人们心智的局限，这些想法才会显得这么奇怪。人们发现要相信时间膨胀和长度收缩等狭义相对论的效应也是很困难的，因为这些效应以前从来就没碰到过。毫无疑问的是，宇宙的诞生必定伴随着许多人们在日常生活中永远也不可能碰到的情形和效应。

宇宙是如何从一个奇点演化到它现在的状态的，这是一个活跃的研究主题。也许宇宙就像一个黑洞，有些人认为它事实上就是一个黑洞。尽管物理学家可以通过如宇宙背景辐射这样的天文观察拼凑出宇宙演化的一些片段，但宇宙诞生的最初那一段时间却一直是个谜。那时的宇宙极其热且极其致密，至少我们今天所理解的物理规律在这些极端条件下是无效的。物理学可以描述大爆炸过后大约 10^{-35} 秒以后的事件，这是极其短暂的一段时间，简直不可思议，对于此前的事情，物理学就没有办法了。

随着时间推移，宇宙冷却了，也膨胀了。关于这个过程的细节并不总是很清楚，但最终夸克和电子等粒子变得紧致了，温度下降得更多之后，夸克便结合成质子和其他

粒子。关于反物质,人们却知之甚少,反物质是否曾经出现过,是否全部的反物质遇到物质后都湮灭掉了,而物质却因为某些原因比反物质多出了那么一点点。大爆炸过后大约 30 万年,温度已经冷却到了足够的程度,质子得以捕获电子形成氢原子。

引力作用导致了物质团的出现,当然引力根本不足以阻止宇宙的膨胀。后来,物质团构成了星体,星体集合到一起就形成了星系。星系的形成是一个问题,因为宇宙在最初的时候很可能是高度统一的。物理学家相信,在宇宙大爆炸过后不久就有一个叫作“暴胀”的快速膨胀的时期,结果导致了密度的变异,继而形成了星体和星系。

要证实过去发生的事情是很困难的,但天文学家却有这方面的优势。往远处看空间与往回看时间的效果是一样的。光速是恒定的,宇宙是如此广袤,甚至连光在星体或星系之间穿行都要花上很长的时间。天文学家用“光年”作为距离的单位,它是光在一年中所走过的路程——大约 5.9 万亿英里(9.4 万亿千米)。一个光年的长度够让人吃惊了,然而银河系的银盘(最厚的部分)的直径却是大约 10 万光年。距离我们最近的星系是一个叫做大犬矮星系的小星系,它离地球的距离是 2.5 万光年。(大犬矮星系刚刚好地位于银河系银盘的外面。)因为从这个星系发出的光要经过 2.5 万光年的长途跋涉才能到达地球,所以地球上的人们看到的是这个星系 2.5 万年前的样子。天文学家在空间上能看得越远,他们在时间上就能回溯得越久。这个时间范围从一些



这是一幅宽边帽星系的图像,星系的形状很像墨西哥人戴的宽边帽,故而得名。(STScl/NASA/AURA)

较近天体的几年到一些很远天体的数十亿年，足以让我们回到宇宙历史的早期阶段。

超新星、脉冲星和类星体

光穿越星体之间的巨大距离需要花费很长的时间，这就意味着天文学家所观察到的宇宙中的事件实际上发生在很多年前。中国人、阿拉伯人和美洲土著居民在 1054 年看到了一颗突然变亮的星体，这颗星体变得如此明亮以至于白天都能看得到，并且持续了数周时间。虽然这颗星的亮度在逐渐降低，但连续好几年的晚上都能看得见，再后来这颗星就慢慢消失了。这是有记载的对超新星这种爆炸星体进行的最早的观察之一。超新星短暂地变得极其明亮，其亮度超出太阳数十亿倍。然而，1054 年看到的那颗星并不是那一年开始爆炸的，因为这颗星距离地球大约 6 300 光年，所以爆炸事件事实上发生在 6 300 年前。光花了那么长的时间才到达地球，然后告诉地球上的人们在那个很遥远的地方很久以前发生了什么。

新星是一种亮度增大的星体——新星(nova)的意思是新的星体(new star)，因为有时亮度的增加会使一颗以前暗淡得看不见的星体变得能被看见，仿佛在原来的位置出现了一颗新星体。然而，超新星的亮度增加要夸张得多，而且在很多情况下都是由星体的灾难性死亡造成的。质量超过太阳至少 5 倍的星体就可能发生这一过程。第 1 章和第 4 章都讲过，在它们生命周期的大部分时间里，星体都能在巨大质量产生的引力和由强烈的热量和辐射产生的外向压力之间维持一个平衡状态。随着星体逐渐耗尽参加第一阶段聚变反应(大部分都是将氢转化为氦)的原子核，外向的压力就降低了。虽然星体的外层在膨胀，但引力使星体的核心收缩。在这个过程中，星体的中央变得更热了，其温度上升到一个足以引发新的一系列聚变反应的程度。这些核反应熔合更重的原子核，制造出镁、硫、钙、铁等元素。但最终，随着残余的小原子核的耗尽，这些活动也停止了，星体已经没有办法来平衡引力引起的压缩作用了。

当最终的坍塌开始时，核心的收缩将原子紧紧地挤压在一起。接着，类似于坠落的球的反弹，原子之间彼此推开，压缩的核心就膨胀了。原子的反弹用巨大的力量把星体的外层部分推开，加热了那些物质并使它们涌向周围的空间。强大的热量又引发了一些新的核反应，形成了铅、金和汞等重元素。超新星是宇宙中所有比铁重的元素的主要来源——组成地球和人体的很多原料都是在超新星爆炸中“煮”出来的。

另一种类型的超新星并不是发生在星体的生命结束之时，当一个星体从其他邻近的星体或尘云中积聚了太多的物质时，也会发生超新星事件。爆炸是类似的，而且有

着相同的效果。在反弹力将星体的外层部分释放出去之后，核心就安定下来了。密度变得如此之大，电子和质子被挤在一起形成了中子。这个过程和第 1 章所讲的放射性衰变正好相反。产生出来的大量中微子都逃逸了，但中子留下来了。在一些超新星事件中，核心的坍塌就到此为止——作用于这个小核心的引力是极其强大的，但紧紧堆在一起的中子抵制住了进一步的压缩，结果是形成了一个中子星。这些星体没有核聚变反应来让它们发光，而且虽然它们的质量比太阳大，它们的直径却一般不会超过 12 英里(20 千米)。如此之大的密度——这么小的体积包含了这么多的物质——给了一颗中子星超过地球数十亿倍的重力。中子星上的一块大理石的重量相当于地球上的一座山。

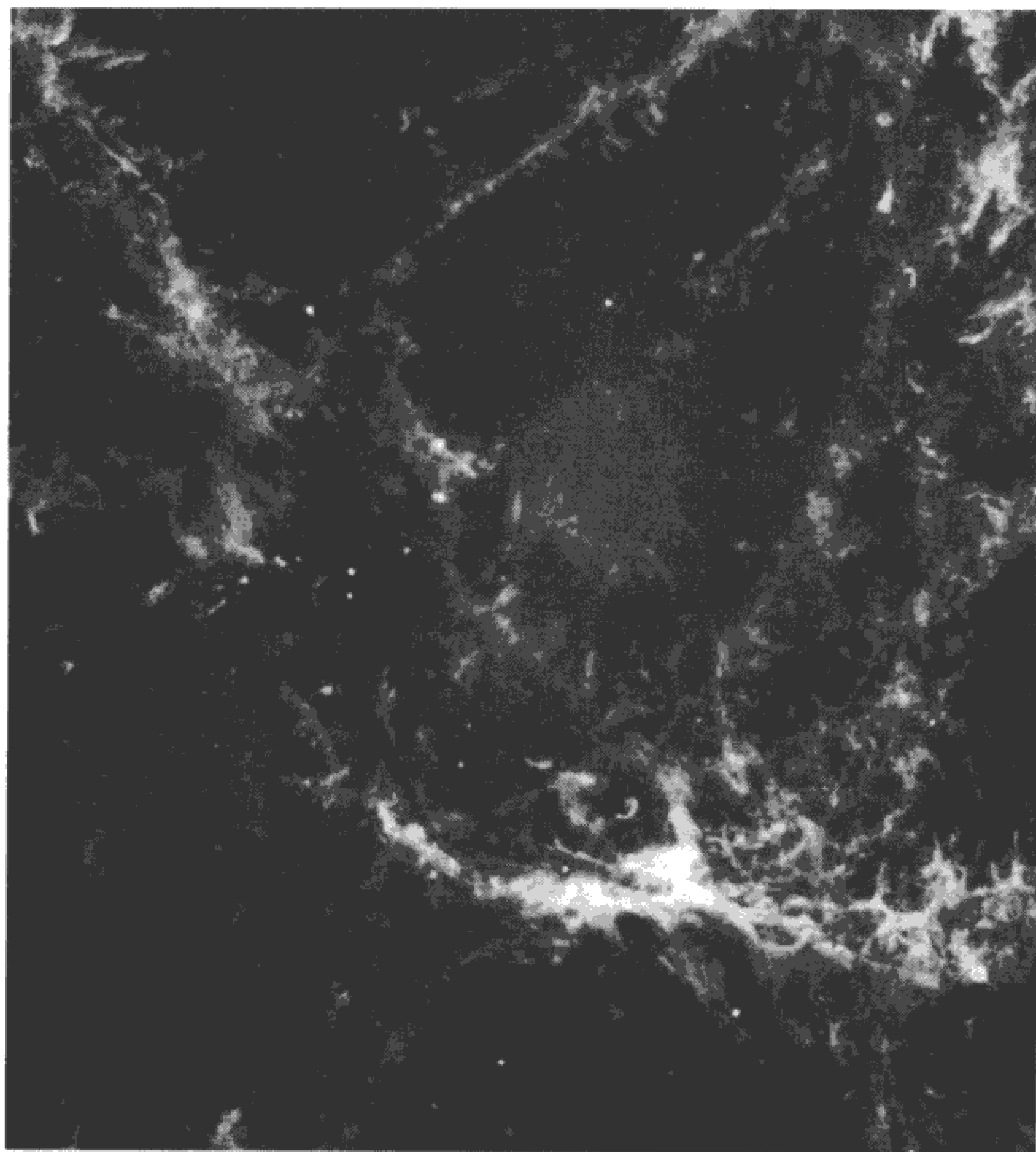
英国天文学家安东尼·休伊什(Anthony Hewish)和他的学生乔斯林·贝尔·伯内尔(Jocelyn Bell Burnell)在 1967 年发现了旋转的中子星的一个有趣的特性。中子星不仅具有很大的重力，而且还拥有很强大的磁场，其强度超出地球磁场大约 1 万亿倍。如此强大的磁场席卷了所有的带电粒子，在磁极周围形成柱状，产生出强烈的辐射束。和地球一样，中子星的磁极和它的旋转轴并不对准(地球的磁极并不位于它的地理北极和南极所在的位置，旋转的中子星也通常如此)。中子星的旋转使辐射束一阵阵地扫过，就像灯塔发出的光束一样。天文学家观察这些射束时看到的是周期性的辐射脉冲，于是将这些中子星取名为脉冲星(pulsar)。所谓脉冲星，就是脉动的星体(pulsating stars)。

1054 年在地球上看到的那次超新星事件产生了一颗脉冲星，这颗星位于人们了解较多的超新星残迹——蟹状星云中。蟹状星云由气体和尘埃以及位于中央的一颗脉冲星组成。蟹状星云得名于 19 世纪中期一位天文学家的一幅绘图，很显然，它的形状与螃蟹有点像，虽然这种相像很可能是由当时的望远镜的局限所造成的。那颗脉冲星以每秒超过 30 周的速度旋转，这个速度对于一个虽然体积很小但质量巨大的物体来说是很惊人的。

对于像太阳这样的质量不够大的星体，在它们生命结束的时候会发生一系列的膨胀和收缩过程，但不像超新星那样富有戏剧性。太阳不会以一次极其光辉的爆炸而告终，也不会形成中子星。当它生命终结的时候，它就变成了一颗白矮星，体积收缩到跟地球一般大。虽然那时它的直径要比现在小大约 100 倍，其密度却达不到中子星那么大(太阳在死亡之前还有 50 亿年左右的生命)。

那些质量是太阳的 10—12 倍甚至更多的星体，因为物质太多了，也不会形成中子星。一些质量和能量在超新星爆炸中逃逸出去了，而留在核心的物质经历着中子根本

无法承受的巨大的引力收缩。正如前一章所介绍的，依照广义相对论，黑洞就形成了（至少在理论上是这样的）。黑洞的密度是如此之大，连光都无法从它的引力中逃脱，但黑洞的质量仍然存在而且吸引宇宙空间中的气体或尘埃，将这些粒子加速、加温到能够发放高能辐射的程度。



蟹状星云是 1054 年在地球上看到的超新星的残余物。（STScl/NASA/AURA）

前面讲到，天文学家已经在宇宙中发现了很多表明黑洞存在的迹象，并且相信在银河系的中心就隐藏着一个巨大的黑洞。银河系的中心密集着大量的星体，这个黑洞可能是通过吞噬邻近的其他一些黑洞才发展到现在的规模的。

黑洞可能还是叫做类星体的一组奇异天体的重要组成成分。类星体是类似于星体的天体，在望远镜中显示为暗淡的星体。来自类星体的光有很大的红移，表明它们距离我们很遥远。这些天体必须发出巨量的辐射，才能让我们在遥远的地球上还能看见它们。有些类星体的亮度变化非常快，而这通常是小星体才具备的特性；大天体的亮度变化一般是比较慢的，因为光需要时间来从一端运行到另一端。类星体的大小被认为跟太阳系差不多，而让它们闪耀的光线却足以和一个星系相媲美！

目前已经知道有超过 5 万余颗类星体，它们大部分距离我们 10 多亿光年，有些甚至远在 120 亿光年之外。许多人都相信这些明亮的天体是由“活动星系”的黑洞组成的。活动星系是那些不仅仅由星体来发光，而是能发出更多的光的星系。这些星系可能包含有巨大的黑洞，物质掉到黑洞的同时产生出巨大的辐射。当有或多或少的物质被吸进黑洞时，天体的亮度就可能发生改变。

120 光年开外的类星体为我们提供了宇宙年轻时的图景——光要花 120 亿年才能到达地球，所以地球上的天文学家现在正看到的是宇宙诞生之后不久发生的事件。有些人认为，在宇宙的早期，许多或者也许全部的星系都经历了一个类似的阶段，先拥有一个精力充沛的青年时期，然后安定下来，步入安逸的中年时期。

万物的理论

早期的宇宙尽管其活动很狂烈，但它可能要比今天的宇宙简单。在能量足够高的情况下，电磁力和弱力的差别就不复存在了——它们有着相同的性质。这个结果来自对早期宇宙的模拟，粒子物理学或高能物理学通过能量密度很高的碰撞模拟了当初的宇宙。加速器是不可能产生出早期宇宙那么多的能量的，这远在它的能力之外，但实验却可以在小范围内创造出包含巨大能量的事件。实验显示，虽然在普通的情形下电磁力和弱力有着明显的区别，但在高能事件中它们却是一样的。物理学家把它们两者的结合称为电弱相互作用(或电弱力)，这是对电磁力和弱力的统一。

将物理学的不同规律和理论统一起来是一件非常吸引人的事情。如果能把大量的观察或规律浓缩为一个统一的表述，物理学将变得优雅、简单而令人满意。对复杂的物理学进行精简一直以来都是物理学家的目标：在 17 世纪，艾萨克·牛顿用相同的观点即万有引力定律解释了苹果落地现象和地球的轨道问题，而在 19 世纪 60 年代，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦将电学和磁学统一为一个单一的理论，即电磁学。

今天的物理学家希望能把电磁力、弱力和强力统一起来，形成一个单一的理论，即

所谓的大统一理论。大部分物理学家都相信在早期的宇宙中，这些力是统一的，只是在宇宙膨胀并冷却之后它们才分开。物理学家提出了一些不同的理论，但它们都很复杂而且难以检验，因为这些力的统一仅仅发生在极端高能的情况下，这一条件超出了当今粒子加速器的上限。

大统一理论并不能令人满意，它是名不副实的。这些理论没有把引力包括进去，而真正的统一理论是不应该把引力遗漏的。在最初的宇宙中，可能只有一种力，它把电磁力、引力、强力和弱力都结合起来了。但要证明这个论断，可能需要再造出宇宙大爆炸过后短暂时间内的极端温度和密度才行。

一个最终的理论应该统一一切事物——量子力学（第 2 章的话题）、标准模型（第 3 章）、相对论（第 4 章）以及一切力和相互作用，包括第 1 章讨论的核反应。有一些统一已经非常明了：电磁力和弱力的统一即电弱力；标准模型和量子力学的结合；核反应用爱因斯坦的质能方程或量子力学的观点都可以得到理解。但最理想的，一个关于万物的理论应该把所有的物理规律都统一为一个单一的概念或方程。

尽管有这样一些进展，构建万物的理论却面临着一个很大的障碍。量子力学和广义相对论是不兼容的，似乎不管做什么修改都不太可能让它们结合起来。最大的问题在于，在广义相对论中找不到海森堡不确定性原则等量子力学基础的安身之地。第 2 章所讨论的量子力学涉及概率问题，而爱因斯坦的广义相对论却没有。

因为它们不兼容，这两种理论中必定有一种是错误的。尽管两者都得到了大量的实验支持，必定有一种理论（也可能两者都有）是有局限性的。这样的局限性存在于牛顿定律中，牛顿定律只适用于非常有限的一些情形，例如低速度（“非相对论的”）和大物体（量子力学对其不重要）。许多人都认为广义相对论更有可能是存在局限性的，因为在日常世界和物理实验中碰到的引力通常都很微弱。当引力很强的时候，就像在早期宇宙中那样，那时的宇宙体积很小但密度很大，而在这样的情况下，量子力学的效应也是非常明显的。

有一种令人振奋的理论涉及一种叫做“弦”的新奇事物。这种理论提议用由振动的细线或者弦组成的基本单元的行为和相互作用来解释一切物理现象，而不再用波和粒子等概念。弦理论也许可以解开波粒二象性这个谜，也可能解决量子力学和广义相对论的不兼容问题。弦理论有好几个版本，每一个都包含复杂的数学原理，还包含一些目前很难或者根本不可能去检验的物体或概念。弦理论尚缺乏实验支持，因此它虽然有趣却仍然是猜测性的（未被证明的）。

宇宙的命运

用一个单一的理论或方程来描述所有的物理现象，其简洁性固然是令人满意的，但这也许永远都不可能。宇宙、力、相互作用和物体可能复杂得根本没有办法用一个单一的大理论来概括。毫无疑问，宇宙诞生及其演化等事件是由远离人们日常生活的力和物体来支配的，这些事物也许甚至超出了人们的理解和想象所能及的范围。

但有关宇宙的命运问题，我们似乎可以得到答案。宇宙或者会一直膨胀下去或者不会，甚至有可能某一天它就开始收缩。在这里，引力作用是很关键的，而引力的大小取决于宇宙所含的物质的量。如果包含足够的质量，其产生的引力就足以在一段时间后终止宇宙的膨胀，并有可能将它往里拉回。

测量宇宙的大小和它所包含的物质的量是一次很艰难的尝试。在搜集这些信息的过程中，一个惊人的结果出现了——宇宙的膨胀似乎正在加速。这个重要的发现来自 1990 年发射的哈勃太空望远镜等强大的望远镜以及其他一些用来探测遥远天体和测量宇宙背景辐射的卫星。近些年得到的有关宇宙大爆炸和宇宙现状的数据表明，宇宙的膨胀既不是恒速的，也不在减速，相反，它正在加速。

宇宙的加速膨胀是很难得到解释的。当某物爆炸时，碎片将以很大的速度飞出，但此后它们就不再能获得能量了——没有发动机来推动它们，让它们加速的唯一的力是爆炸时的冲击力。在地球的大气层，由于存在空气阻力，碎片的速度要慢下来，而在没有空气的宇宙空间，它们将保持爆炸时获得的初始速度。所以，即使在宇宙空间，这些碎片也不应该会加速。然而，这似乎是膨胀的宇宙正在表现出来的行为。

有人提出可能存在一种与引力的效果相反的物质或能量，它们能够施加一种反引力的排斥力。这种能量称为暗能量(之所以称之为“暗”，是因为它很神秘也很隐蔽)。宇宙的加速膨胀似乎无需考虑物质的密度和引力吸引这些因素，因为有暗能量一直在使宇宙相互分离。结果是，宇宙没完没了的膨胀，变得越来越大而密度越来越小，直到遥远的将来，几乎什么活动都不再发生。

广义相对论可以通过在其方程中加入某一项来容纳暗能量这样的概念，就像爱因斯坦曾经添加过的宇宙常数那样，只不过和宇宙常数阻止或取消宇宙膨胀不同，新加的这一项是使膨胀加速的。然而，还没有人知道暗能量是由什么组成的，也没有人知道该怎么测量它。

如果暗能量和宇宙的加速膨胀都得到了证实，而不仅仅是误解或错误的产物，那

它们告诉我们的是:宇宙仍然还有很多奥秘。万物的理论也许是不存在的,至少以人类目前的知识水平,试图去构建一个这样的理论是不合时宜的。我们要去了解的还有很多很多。

宇宙可能并不像人们曾经以为的那样无边无际,但它却是极其广袤的,浩浩荡荡绵延了数十亿光年。理解宇宙的困难至少部分是因为,除了爱因斯坦和其他一些伟大的思想者,大多数人的想象力远远没有宇宙那么大。诸如红移、脉冲星和类星体等天文观察和发现为我们提供了有关宇宙的许多引人入胜的信息。但关于宇宙的起源和演化,还有很多的未解之谜。宇宙学作为物理学的一门分支已经有了一个良好的开端,其前景是美好的,但我们要做的还有很多很多。

结　语

和新环境、新情形的相遇往往会带来令人兴奋的新奇发现。欧洲探险家在 15、16 世纪发现了美洲新大陆，在此之前并没有人知道有这么一块地方。20 世纪的物理学家开始探索微观粒子和那些涉及极端高速的事件，结果发现那些他们长期据以为真的理论和原理再也不能适用。牛顿的经典物理学虽然在某些领域仍然有用，但它已经让位给了量子理论和相对论。

科学总是从观察和测量开始的。对观察和测量结果的解释便形成了理论的基础，而理论则要由进一步的观察和测量来检验。但有些时候，是先有理论的，爱因斯坦的许多观点就是这样的。不管怎样，实验者都必须先去验证理论的逻辑推论和预测，而在此之前，我们是不能过分相信它的。这个过程就是科学的本质。但近期的物理学和物理学家对此却很为难。自 20 世纪开始直到今天，物理学的前沿通常涉及巨大或超小的物体和极端高速，而这一类实验总是耗资巨大。

物理实验很多时候用到的还是并不贵重的设备，但它们也可以作出有价值的新发现，例如对超导体的研究(超导体是没有电阻的导体，它通常用于需要很强的电磁效应的仪器中)。然而，许多现代实验都需要使用第 3 章中所讲的巨型粒子加速器等设备，其花费通常是数十亿美元。另一个花费巨大的例子是 NASA 的一项名为“激光干涉仪空间天线”(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)的旨在探测引力波的计划。目前 LISA 仍处于计划阶段。

在理论上，引力波起源于经历引力相互作用的物质，类似于电磁波和电磁相互作用。广义相对论预言了引力波的存在，LISA 计划是对这一理论的一次很好的检验。如果找到了这种波，其意义就不仅仅在于支持了一个重要的理论，而且能马上应用到天文学中，因为引力波可以成为研究星体和星系的有力工具。

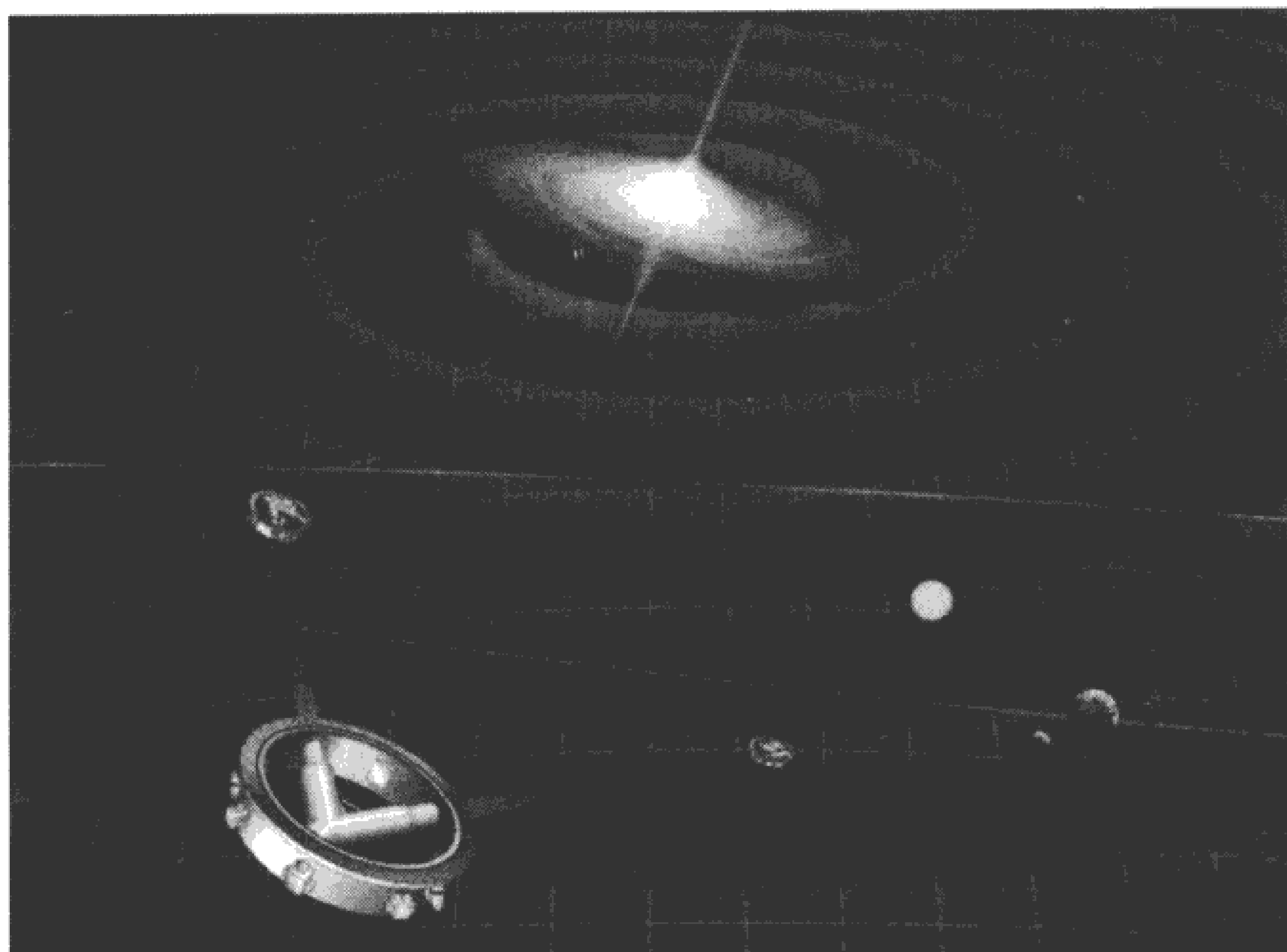


LISA 的太空船呈 Y 形结构；3 艘太空船共同组成一个大型干涉仪。(NASA/JPC-Caltech)

探测引力波就是要测量当这些波穿过空间或物质时所引起的极其微小的振动。要在地球表面进行这样的实验是很困难的，因为地球上有很多与引力波不相关的运动和振动，它们会掩蔽引力波的存在。LISA 计划包括 3 艘太空船，它们将从地球上由火箭发射升空。这 3 艘太空船是完全相同的，每一艘上面都有一个激光器、一个望远镜和作为引力参照传感器的测试物质。LISA 的 3 艘太空船将在宇宙空间中形成一个巨大的等边三角形——3 条边相等，3 个角也相等——每条边的长度为 312.5 万英里(500 万千米)。在这样的配置下，3 艘太空船实际上组成了一个大型的干涉仪，与迈克尔逊和莫雷所使用的干涉仪相类似(第 4 章讲过)。LISA 的设备是相当灵敏的，其目标就是检测在引力波穿越三角形起伏前进时太空船之间的距离变化。

目前 LISA 计划还只存在于纸上，预定在 2015 年或者更后的时间实施发射升空，但预算总是一个问题。用于 LISA 的经费有可能被转移到其他项目上，从而推迟发射日期或干脆将整个计划取消。由政府机构和大学资助的科研项目被取消并不是什么新鲜的事情。一个原计划在得克萨斯州建造的名为"超导超级碰撞机"(Superconducting Super Collider，SSC)的粒子加速器本可以用来实现粒子物理学的能量新高，可是一路攀升的巨额花费使其于 1993 年夭折了，这时，建造工程已经开始而且已经花

了超过 10 亿美元。



LISA 的任务是探测在宇宙空间中起伏前进的引力波。(NASA/JPL-Caltech)

实验是物理学等科学前进的动力,而不管实验的目的是进行一套独特观察还是检验某个理论的具体假设。得不到实验支持的观点其价值是有限的;第 5 章中简要介绍的弦理论虽然潜力无限,但因为它难以检验因而也难以相信。《粒子与宇宙》这本书中所讨论的物理学分支将来很有希望能够解释那些最深刻的科学之谜,然而现在要克服的限制却不仅仅是知识上的,而且还有经济上的。

爱因斯坦仅仅用笔、纸和他的想象就改变了物理学的面目。然而,即使是如爱因斯坦这样伟大的物理学家的观点如果没有实验的检验,也是不能被接受的。也许只有当那些天才的思考者不仅仅花时间来产生新鲜的思想,而且也去考虑如何在有限的预算内检验他们的理论时,物理学的光辉未来才能够真正地到来。

元素周期表

原子序数 ← 19 K → 元素符号
钾 → 元素名称
注*的是人造元素
原子量 ← 39.0983

族/周期	ⅠA	ⅡA	ⅢB	ⅣB	ⅤB	ⅥB	ⅦB	Ⅷ			ⅠB	ⅡB	ⅢA	ⅣA	ⅤA	ⅥA	ⅦA	0	电子层	0族电子数
1	1 H 氢 1.00794(7)																	2 He 氦 4.002602(2)	K	2
2	3 Li 锂 6.941(2)	4 Be 铍 9.012182(3)											5 B 硼 10.811(7)	6 C 碳 12.0107(8)	7 N 氮 14.0067(2)	8 O 氧 15.9994(3)	9 F 氟 18.9984032(5)	10 Ne 氖 20.1797(6)	L K	8 2
3	11 Na 钠 22.989770(2)	12 Mg 镁 24.3050(6)											13 Al 铝 26.981538(2)	14 Si 硅 28.0855(3)	15 P 磷 30.973761(2)	16 S 硫 32.065(5)	17 Cl 氯 35.453(2)	18 Ar 氩 39.948(1)	M L K	8 8 2
4	19 K 钾 39.0983(1)	20 Ca 钙 40.078(4)	21 Sc 钪 44.955910(8)	22 Ti 钛 47.867(1)	23 V 钒 50.9415(1)	24 Cr 铬 51.9961(6)	25 Mn 锰 54.938049(9)	26 Fe 铁 55.845(2)	27 Co 钴 58.933200(9)	28 Ni 镍 58.6934(2)	29 Cu 铜 63.546(3)	30 Zn 锌 65.39(2)	31 Ga 镓 69.723(1)	32 Ge 锗 72.64(1)	33 As 砷 74.92160(2)	34 Se 硒 78.96(3)	35 Br 溴 79.904(1)	36 Kr 氪 83.80(1)	N M L K	8 18 8 2
5	37 Rb 铷 85.4678(3)	38 Sr 锶 87.62(1)	39 Y 钇 88.90585(2)	40 Zr 锆 91.224(2)	41 Nb 铌 92.90638(2)	42 Mo 钼 95.94(1)	43 Tc 锝 (97.99)	44 Ru 钌 101.07(2)	45 Rh 铑 102.90550(2)	46 Pd 钯 106.42(1)	47 Ag 银 107.8682(2)	48 Cd 镉 112.411(8)	49 In 铟 114.818(3)	50 Sn 锡 118.710(7)	51 Sb 锑 121.760(1)	52 Te 碲 127.60(3)	53 I 碘 126.90447(3)	54 Xe 氙 131.293(6)	O N M L K	8 18 18 8 2
6	55 Cs 铯 132.90545(2)	56 Ba 钡 137.327(7)	57—71 La-Lu 镧系	72 Hf 铪 178.49(2)	73 Ta 钽 180.9479(1)	74 W 钨 183.84(1)	75 Re 铼 186.207(1)	76 Os 锇 190.23(3)	77 Ir 铱 192.217(3)	78 Pt 铂 195.078(2)	79 Au 金 196.96655(2)	80 Hg 汞 200.59(2)	81 Tl 铊 204.3833(2)	82 Pb 铅 207.2(1)	83 Bi 铋 208.98038(2)	84 Po 钋 (209,210)	85 At 砹 (210)	86 Rn 氡 (222)	P O N M L K	8 18 32 18 8 2
7	87 Fr 钫 (223)	88 Ra 镭 (226)	89—103 Ac-Lr 锕系	104 Rf 𬬻* (261)	105 Db 𬭊* (262)	106 Sg 𬭳* (263)	107 Bh 𬭛* (264)	108 Hs 𬭶* (265)	109 Mt 鿏* (268)	110 Uun * (269)	111 Uuu * (272)	112 Uub * (277)								

镧系	57 La 镧 138.9055(2)	58 Ce 铈 140.116(1)	59 Pr 镨 140.90765(2)	60 Nd 钕 144.24(3)	61 Pm 钷* (147)	62 Sm 钐 150.36(3)	63 Eu 铕 151.964(1)	64 Gd 钆 157.25(3)	65 Tb 铽 158.92534(2)	66 Dy 镝 162.50(3)	67 Ho 钬 164.93032(2)	68 Er 铒 167.259(3)	69 Tm 铥 168.93421(2)	70 Yb 镱 173.04(3)	71 Lu 镥 174.967(1)
锕系	89 Ac 锕 (227)	90 Th 钍 232.0381(1)	91 Pa 镤 231.03588(2)	92 U 铀 238.02891(2)	93 Np 镎 (237)	94 Pu 钚 (239,244)	95 Am 镅* (243)	96 Cm 锔* (247)	97 Bk 锫* (247)	98 Cf 锎* (251)	99 Es 锿* (252)	100 Fm 镄* (257)	101 Md 钔* (258)	102 No 锘* (259)	103 Lr 铹* (260)

注：1. 原子量录自 1999 年国际原子量表，以 $^{12}C=12$ 为基准。原子量的末位数的准确度加注在其后括弧内。
2. 括弧内数据是天然放射性元素较重要的同位素的质量数或人造元素半衰期最长的同位素的质量数。
3. 105—109 号元素中文名称分别读作 dù(𬭊)、xǐ(𬭳)、bō(𬭛)、hēi(𬭶)、mài(鿏)。

化学元素表

(g) 无　(c) 非金属

元素	符号	a. n.
碳	C	6
氢	H	1

(g) 氧族　(c) 非金属

元素	符号	a. n.
氧	O	8
钋	Po	84
硒	Se	34
硫	S	16
碲	Te	52
	Uuh	116

(g) 碱金属　(c) 金属

元素	符号	a. n.
铯	Cs	55
钫	Fr	87
锂	Li	3
钾	K	19
铷	Rb	37
钠	Na	11

(g) 碱土金属　(c) 金属

元素	符号	a. n.
钡	Ba	56
铍	Be	4
钙	Ca	20
镁	Mg	12
镭	Ra	88
锶	Sr	38

(g) 无　(c) 金属

元素	符号	a. n.	元素	符号	a. n.
铝	Al	13	钪	Sc	21
𬭛	Bh	107	𬭳	Sg	106
镉	Cd	48	银	Ag***	47
铬	Cr	24	钽	Ta	73
钴	Co	27	锝	Tc	43
铜	Cu***	29	铊	Tl	81
	Ds	110	钛	Ti	22
𬭊	Db	105	锡	Sn	50
镓	Ga	31	钨	W	74
金	Au***	79		Uub	112
铪	Hf	72		Uut	113
𬭶	Hs	108		Uuq	114
铟	In	49	钒	V	23
铱	Ir****	77	钇	Y	39
铁	Fe	26	锌	Zn	30
铹	Lr	103	锆	Zr	40
铅	Pb	82			
镥	Lu	71			
锰	Mn	25			
鿏	Mt	109			
汞	Hg	80			
钼	Mo	42			
镍	Ni	28			
铌	Nb	41			
锇	Os****	76			
钯	Pd****	46			
铂	Pt****	78			
铼	Re	75			
铑	Rh****	45			
	Rg	111			
钌	Ru****	44			
𬬻	Rf	104			

(g) 磷族　(c) 金属

元素	符号	a. n.
砷	As*	33
锑	Sb*	51
铋	Bi	83
氮	N	7
磷	P**	15
	Uup	115

(g) 无　(c) 半金属

元素	符号	a. n.
硼	B	5
锗	Ge	32
硅	Si	14

(g) 锕系　(c) 金属

元素	符号	a. n.
锕	Ac	89
镅	Am	95
锫	Bk	97
锎	Cf	98
锔	Cm	96
锿	Es	99
镄	Fm	100
钔	Md	101
镎	Np	93
锘	No	102
钚	Pu	94
镤	Pa	91
钍	Th	90
铀	U	92

(g) 镧系　(c) 金属

元素	符号	a. n.
铈	Ce	58
镝	Dy	66
铒	Er	68
铕	Eu	63
钆	Gd	64
钬	Ho	67
镧	La	57
钕	Nd	60
镨	Pr	59
钷	Pm	61
钐	Sm	62
铽	Tb	65
铥	Tm	69
镱	Yb	70

(g) 卤族　(c) 非金属

元素	符号	a. n.
砹	At*	85
溴	Br	35
氯	Cl	17
氟	F	9
碘	I	53
	Uus*	117

(g) 惰性气体 (c) 非金属

元素	符号	a. n.
氩	Ar	18
氦	He	2
氪	Kr	36
氖	Ne	10
氡	Rn	86
氙	Xe	54
	Uuo	118

a. n. ＝原子序数
(g)＝族
(c)＝类

* ＝半金属(c)
** ＝非金属(c)
*** ＝铸币金属(g)
**** ＝贵金属(g)

译者感言

了解自身，先从了解我们所在的世界开始。翻译《粒子与宇宙》这本书对我是一次激动人心的旅行，旅途上有辛酸但更有快乐的享受，我借着想象的翅膀在时空中畅游，最后归于沉静的思考。关于世界，我们知道的还太少，而关于自身，我们又能知道多少？相信读者捧读这本书时，会或多或少地与我共鸣，也与伟大的思想共鸣。在此，我谨向默默地支持我的工作的李惠、王刚、鲁振刚和陈燕等朋友表示诚挚的谢意。

雷　泉

2007 年 9 月于北京大学